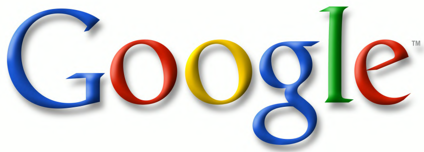
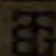


GRUNDLAGEN DER BALLONFÜHRUNG

VON

DR. R. EMDEN

G. TEUBNER  LEIPZIG-BERLIN


THE LIBRARY OF CONGRESS
1800

HERRN

MAJOR HEINRICH NEES

FÜHRER DES K. B. TELEGRAPHEN-DETACHEMENTS

1905—1908

KOMMANDEUR DER K. B. LUFTSCHIFFERABTEILUNG

GEWIDMET

VORWORT.

Die Ballonführung ist eine Fertigkeit, die in erster Linie durch praktische Übung erlernt werden muß; eine theoretische Ausbildung des Führers könnte deshalb überflüssig erscheinen. Allein die Überzeugung, daß nur bei gleichzeitiger, theoretischer Schulung aus einer Waffe alles herausgeholt werden kann, was sie herzugeben vermag, und die z. B. den Artilleristen nicht einzig auf praktische Übungen beschränkt, verlangt auch eine vertiefte, theoretische Ausbildung des Ballonführers, die, innerhalb geeigneter Grenzen gehalten, vernünftige Ziele anzustreben hat. Niemals darf diese Schulung darauf ausgehen, Gesetze oder auch nur Gesichtspunkte aufzustellen, nach welchen gehandelt werden muß; niemals darf rasches Entschließen des Führers durch theoretische Überlegung gelähmt werden. Der Sportsmann, ausgerüstet mit Vorsicht, Kühnheit und gesundem Menschenverstande, wird bessere Erfolge erzielen als der „gelernte“ Führer, dessen Denken und Handeln durch die Blässe theoretischer Spekulation angekränkelt ist. Eine vernünftige Ausbildung hat lediglich anzustreben, den Führer mit den Eigenschaften seines Fahrzeuges so vertraut zu machen, daß sein Überlegen und Entschließen instinktiv in richtige Bahnen gelenkt werden. Diesem Zwecke soll das vorliegende Büchlein dienen. In einer Reihe kurzer Abschnitte sind die wichtigsten Gesetze, denen der Ballon gehorcht, dargestellt; zahlreiche Beispiele suchen sie auch dem theoretischen Betrachtungen weniger Zugänglichen zu erläutern. Sie sind möglichst zahlenmäßig durchgeführt; denn volles Verständnis für das qualitative Zusammenwirken der einzelnen Faktoren kann nur durch quantitatives Durchführen spezieller Fälle erreicht werden.

Dem Kapitän eines Schiffes ist mit der Kenntnis seines Fahrzeuges allein nicht gedient. Von ebenso großer Bedeutung ist für ihn die Kenntnis des Fahrwassers. Dasselbe gilt für den Ballonführer; sein Fahrwasser ist die Atmosphäre; meteorologische Schulung muß ihn mit deren Eigenschaften vertraut machen. Das „Fahrzeug“ ist im vorliegenden Büchlein behandelt; einen zweiten Teil, das „Fahrwasser“, die Grundlagen der meteorologischen Schulung des Führers enthaltend, hoffe ich bald folgen lassen zu können.

Weißbad bei Appenzell, August 1910. R. EMDEN.

INHALTSVERZEICHNIS.

TABELLEN.

TAFELN.

§ 1. Die Gasdichte.

Das Gewicht des Kubikmeters eines Gases werde *Dichte* genannt und mit ρ bezeichnet; dasselbe ist abhängig vom Drucke b, gemessen in Millimetern Quecksilber, und der Temperatur t, gemessen in Celsiusgraden. Ist die durch den Barometerstand b_1 und die Temperatur t_1 bestimmte Dichte ρ_1 bekannt, so ist für alle Werte von b und t die Dichte mit genügender Genauigkeit gegeben durch die Formel

$$1)\qquad \rho = \rho_1 \frac{b}{b_1} [1 - \alpha (t - t_1)].$$

α hat den Wert $1/_{273} = 0{,}003\,665$. Da bei der Lösung von Aufgaben, wie sie sich dem praktischen Luftschiffer darbieten, größte Genauigkeit nicht erforderlich und meistens unerreichbar ist, genügt es, $\alpha = 0{,}004 = 4\,\permil$ zu setzen. Wir erhalten so den Satz:

Die Dichte eines Gases nimmt um $4\,\permil$ ihres Wertes ab oder zu, so oft die Temperatur um 1^0 steigt oder sinkt, und nimmt um $1\,\%$ ihres Wertes zu oder ab, so oft der Barometerstand um $1\,\%$ zu- oder abnimmt.

Wir greifen den nachfolgenden Ausführungen vor und merken uns:

Der Barometerstand nimmt um $1\,\%$ seines Wertes zu oder ab, so oft wir in der Atmosphäre 80 m ab- oder aufsteigen.

Unter der Normaldichte ρ_0 eines Gases verstehen wir die durch die Werte $b = 760$ mm und $t = 0^0$ C. ausgezeichnete Dichte. Die *Tabelle der Gaskonstanten* (Seite 2) gibt dieselben für die in Betracht kommenden Gase. (Die Luft ist trocken angenommen; Änderungen ihrer Dichte durch die in Wirklichkeit vorkommenden Beimengungen des $5/_8$mal schwereren Wasserdampfes können vernachlässigt werden).

Unter dem spezifischen Gewicht s eines Gases verstehen wir das Verhältnis der Gewichte gleicher Volumteile Gas und Luft, falls Druck und Temperatur für beide gleiche, aber beliebige Werte haben. Die Gleichheit des α der Formel 1 für alle Gase ermöglicht die Einführung dieser von Druck und Temperatur unabhängigen Größe. Durch Multiplikation einer Luftdichte ρ

Tabelle der Gaskonstanten.

	Normaldichte ρ_0 Kilogramm / Kubikmeter	Normalvolumen v_0 Kubikmeter / Kilogramm	Spezifisches Gewicht s	Normaltragkraft eines Kubikmeters in Kilogrammen $\rho_0(1-s)$	Tragkraft eines Kilogramms in Kilogrammen $\frac{1-s}{s}$	$\frac{s}{1-s}$	$\frac{1}{1-s}$
Luft	1,293	0,773	1	0	0	∞	∞
Wasserstoffgas, rein .	0,089	11,23	0,069	1,20	13,48	0,074	1,074
Wasserstoffgas, unrein	0,15	6,67	0,116	1,14	7,62	0,131	1,131
Leuchtgas	0,52—0,65	1,92—1,54	0,402—0,503	0,77—0,64	1,49—0,99	0,67-1,01	1,67-2,01
Leuchtgas, Mittelwert	0,59	1,695	0,456	0,7	1,192	0,839	1,84

mit s (siehe Tabelle der Gaskonstanten) erhalten wir die Dichte ρ' dieses Gases bei denselben Werten von b und t:

2) $$\rho' = s\rho.$$

Wiegt der Kubikmeter eines Gases ρ Kilogramm, so nimmt 1 kg einen Raum $v = \frac{1}{\rho}$ cbm ein. Dies Volumen der Gewichtseinheit eines Gases ist somit abhängig von b und t nach der Formel

3) $$v = v_1 \frac{b_1}{b} [1 + \alpha (t - t_1)],$$

wenn v_1 durch b_1 und t_1 bedingt ist. (Die Tabelle der Gaskonstanten enthält die zu 760 mm und $t = 0^0$ gehörigen Werte v_0). Für jeden Grad Temperaturänderung ändert v in *gleichem* Sinne seinen Wert um 4‰, ebenso um 1%, wenn der Druck im entgegengesetzten Sinne um 1% sich ändert.

Beispiel 1. Es kann nicht genug betont werden, daß die Dichte der Luft schon an der Erdoberfläche, der Abfahrtsstelle, ganz außerordentlich verschieden sein kann. In München, zur Zeit eines sommerlichen Minimums, etwa bei $b = 700$ mm, $t = 25^0$, beträgt sie 1,09 kg; in Berlin zur Zeit eines winterlichen Maximums mit $b = 770$ mm, $t = -15^0$, aber 1,38 kg. Der Unterschied der Gewichte dieser beiden Kubikmeter Luft beträgt somit rund 0,3 kg, das sind 25% der Normaldichte. (40.4‰ = 16% rühren her von der Temperaturdifferenz, 9% von der Verschiedenheit der Barometerstände). Ein Ballon

vom Volumen des Zeppelinschen, 15000 cbm, verdrängt an diesen Orten Luftmengen, deren Gewichte, und somit deren Auftriebe, sich um 4500 kg unterscheiden.

Beispiel 2. Der Drachenballon ($V = 600$ cbm) soll auf der Malserhaide oder der Gegend von Andermat (Höhe 1500 m; $b = 630$ mm) oder im oberen Engadin (Höhe 1800 m; $b = 607$ mm) steigen. Wieviel Flaschen komprimierten Wasserstoffgases sind zu dessen Füllung erforderlich? Bei $b = 760$ mm sind, da eine Flasche 5 cbm liefert, 120 Flaschen nötig. Da ein Gasvolumen sich bei Ausdehnung von 760 auf 630 mm im Verhältnis 760 : 630 vergrößert, so sind zur Füllung $600 \cdot \frac{630}{760} = 497$, resp. $600 \cdot \frac{607}{760} = 479$ cbm, also 100 resp. 95 Flaschen erforderlich. Es können also 20 Flaschen, der Inhalt eines Fahrzeuges des Luftschifferparkes, erspart werden.

Beispiel 3. Der Zeppelinsche Ballon, $V = 15\,000$ cbm, steht nachts prall gefüllt in einer Halle. Im Laufe des Tages steigt die Temperatur in derselben und somit die Temperatur der Füllung um 5^0. Wieviel Gas entweicht durch die Füllansätze? Da 1^0 das Gasvolumen um 4‰, 5^0 demnach um 2% vergrößern, so entweichen 300 cbm. 10^0 Temperatursteigerung würden die zur Füllung des Drachenballons erforderliche Gasmenge liefern.

§ 2. Abhängigkeit des Luftdruckes von der Höhe und Folgerungen.

Der Luftdruck an jeder Stelle der ruhenden Atmosphäre ist bestimmt durch das Gewicht der höher liegenden Luftmassen. Steigen wir empor, so nimmt die über uns liegende Luftmenge ab und damit der Luftdruck. Das Gesetz dieser Abnahme soll dargelegt werden.

Am Meeresniveau sei bei 0^0 der Barometerstand 760 mm. Eine Quecksilbermenge von 1 qm Bodenfläche und 760 mm Höhe wiegt 10330 kg; ebenso groß ist deshalb der Druck der Atmosphäre auf 1 qm Grundfläche. Nun wiegt bei 0^0 und 760 mm ein Kubikmeter Luft 1,293 kg, d. i. 7991 mal weniger als der Druck der Atmosphäre. Wir haben deshalb 7991 dieser 1 cbm großen, 1,293 kg schweren Luftwürfel aufzubeigen, also eine Luftsäule von 7991 m und überall *konstanter* Dichte, eine *homogene* Luftsäule aufzubauen, damit sie auf ihre Unterlage ebenso stark drückt wie die in Wirklichkeit vorhandene Atmosphäre. Angenommen anderseits, wir befinden uns an einer beliebig höher gelegenen Stelle, ausgezeichnet durch den Barometer-

stand b mm und $t = 0^0$; der Luftdruck hat im Verhältnis $b : 760$ abgenommen; da aber nach Formel 1 das Gewicht eines Kubikmeters der Luft, *die uns unmittelbar umgibt*, in demselben Verhältnis abgenommen hat, so haben wir aus *dieser* Luft wiederum eine homogene Säule von 7991 m Höhe aufzurichten, um von ihr auf ihre Unterlage denselben Druck b mm zu erhalten, den wir um uns beobachten. Wir schließen somit:

Errichten wir an irgend einer Stelle der Atmosphäre aus der Luft, die wir augenblicklich einatmen, eine homogene Luftsäule von 7991 m Höhe, so herrscht an ihrer Basis derselbe Luftdruck, den wir in Wirklichkeit an dieser Stelle beobachten.

Wir nennen diese vom Luftdruck unabhängige Säulenhöhe die *Normalhöhe der homogenen Atmosphäre*, setzen sie praktisch mit genügender Genauigkeit gleich 8000 *m* und bezeichnen sie mit H_0.

Bei Bestimmung dieser Normalhöhe haben wir die Temperatur durch die ganze Höhe der homogenen Luftsäule hindurch zu 0^0 angenommen. Da wir aber zum Bau einer Luftsäule stets Luft von der Beschaffenheit derjenigen, die uns augenblicklich umgibt, verwenden müssen, so haben wir der Luftsäule noch die entsprechende Temperatur zu geben. Die Säulenhöhe erhöht oder verkürzt sich in demselben Verhältnis, als die zum Bau verwendete Luft infolge ihrer von 0^0 verschiedenen Temperatur leichter oder schwerer wird (vgl. § 1). Wir erhalten deshalb die *Höhe H der homogenen Atmosphäre*, unabhängig von Druck und Dichte, aber abhängig von der Temperatur, gegeben durch die Beziehung

4) $$H = H_0\,(1 + \alpha t^0) = 8000\,(1 + \alpha t) \text{ Meter.}$$

Diese Höhe ändert sich pro Grad um rund $4^0/_{00}$, das sind 32 m. Sie spielt in der Aerostatik und Aerodynamik eine so fundamentale Rolle, daß wir sie gleichsam in einem Modell dargestellt haben. Dies Modell gestattet mit Leichtigkeit den *wichtigsten Satz der Aerostatik abzuleiten.*

An einem Orte O der Atmosphäre herrsche der Druck b Millimeter. Wir errichten hier in Gedanken die 8000 m hohe Säule der homogenen Atmosphäre. Steigen wir in ihr von O aus um 1 m empor, so nimmt der Druck selbstversändlich um $\frac{1}{8000}$ seines Wertes ab. Da aber gemäß ihrer Definition diese Luftsäule aus Luft aufgebaut ist von derselben Beschaffenheit, wie sie in der wirklichen Atmosphäre in der Umgebung des Ortes O vorhanden ist, so erhalten wir offenbar dieselbe Druckabnahme, ob wir um dasselbe kleine Stück in der wirklichen oder in der homogenen Atmosphäre emporsteigen. Wir erhalten so den *Fundamentalsatz:*

Steigen wir an irgend einem Orte der Atmosphäre 1 m auf oder ab, so nimmt der Druck um $\frac{1}{8000}$ *seines Wertes ab oder zu; er ändert sich um 1 %, wenn die Höhenänderung 80 m beträgt.*

Setzen wir die einer Höhenänderung von 800 m entsprechende Druckänderung zu 10 % $= \frac{1}{10}$ an, so erhalten wir den Enddruck auf etwa ½ % genau; auf 2 % genau, wenn wir für 1600 m Höhenänderung 20 % $= \frac{1}{5}$ ansetzen. Wir brauchen deshalb bei Bemessung der einzelnen Schrittlängen bei diesen und den folgenden Gesetzen nicht gar zu ängstlich zu sein.

Bei konstanter Temperatur ändert sich die Luftdichte wie der Druck. Von Temperaturänderungen abgesehen, die wir für sich berücksichtigen werden, haben wir somit den Satz:

Steigen wir von irgend einem Orte der Atmosphäre aus 1 m auf oder ab, so nimmt die Dichte um $\frac{1}{8000}$ *ihres Wertes ab oder zu; um 1 %, wenn die Höhenänderung 80 m beträgt.*

Und ebenso;

Steigen wir von irgend einem Niveau aus 1 m auf oder ab, so nimmt das Volumen einer Luftmasse um $\frac{1}{8000}$ *zu oder ab, um 1 %, wenn die Höhenänderung 80 m beträgt.*

Damit ist die Gasmenge bestimmt, die durch den Füllansatz eines ganz gefüllten, steigenden Ballons entweicht.

Wir greifen den nachfolgenden Ausführungen vor und fügen bei:

Steigt ein ganz gefüllter, mit offenem Füllansatz versehener Ballon von irgend einem Niveau aus um 1 m empor, so nimmt seine Tragkraft um $\frac{1}{8000}$ *ab; um 1 %, wenn die Steigung 80 m beträgt.*

Dieser Satz enthält das weiter unten erläuterte Gesetz der Ballastwirkung. Der Luftwiderstand bewegter Körper ist unter sonst gleichen Umständen proportional der Luftdichte. Daher:

Der Luftwiderstand, den ein mit konstanter Geschwindigkeit fahrender Lenkballon erfährt, nimmt um 1 % ab resp. zu, wenn sich die Höhe der Fahrt um $\pm$ *80 m ändert.*

Die Höhe der homogenen Atmosphäre ändert sich mit der Temperatur pro Grad um 4 ‰ ihres Wertes. Beträgt die *mittlere* Lufttemperatur t^0, so haben wir in den angeführten Gesetzen statt 80 m einzusetzen 80 $(1 + \alpha t^0)$ m, was bei großen Höhendifferenzen zu berücksichtigen ist.

Befinden wir uns statt in der Erdatmosphäre an einer Stelle in einer Gasmasse, etwa im Innern eines gefüllten Ballones, und beobachten an dieser Stelle den Druck b Millimeter, so

können wir ihn ebenfalls verursacht denken durch eine homogene Gassäule, aufgebaut aus diesem Gase von der Beschaffenheit an der Beobachtungsstelle, falls wir ihre Höhe richtig bemessen. Dieselben Überlegungen wie oben zeigen, daß diese Höhe unabhängig ist vom Druck; da aber 1 cbm eines Gases, dessen spezifisches Gewicht s ist, $s$mal mehr wiegt als 1 cbm Luft, so ist die Höhe der homogenen Gassäule offenbar $s$mal *geringer* wie die Höhe der homogenen Luftsäule. Wir erhalten deshalb die

5) Höhe der homogenen Gassäule $= \frac{8000}{s}(1 + \alpha t)$ Meter.

Für Wasserstoffgas ($s = 0{,}069$) und Leuchtgas ($s = 0{,}46$) ergeben sich die Normalhöhen ($t = 0^0$) der homogenen Gassäulen zu 115 940 m resp. 17 390 m. Damit der Druck in solchen Gasmassen, die unter Einfluß der Erdschwere im Gleichgewicht sind, um 1% abnimmt, müssen wir 1160 m resp. 174 m emporsteigen. Auf dem Überschuß dieser Höhen über 80 m bei atmosphärischer Luft beruht, wie wir sehen werden, das Steigvermögen der mit diesen Gasen gefüllten Ballone.

Beispiel 4. In München, Höhe 520 Meter, $b = 720$ mm, steigt der Drachenballon, Inhalt 600 cbm, bis 1000 m Meereshöhe auf.

a) Unter welchem Luftdruck steht er in dieser Höhe? Da der Luftdruck pro Meter Steigung um $\frac{1}{8000}$ abnimmt, so nimmt er bei 480 m Steigung um $720 \cdot \frac{480}{8000} = 43$ mm ab. (Oder da $480 = 6.80$, nimmt der Luftdruck um 6% ab, was wiederum 43 mm ergibt.) Der Luftdruck in 1000 m beträgt somit 677 mm. (Die barometrische Höhenformel ergibt 678 mm.) Die mittlere Lufttemperatur ist dabei zu 0^0 angenommen. Betrüge sie im Mittel 10^0, so wäre für 8000 ein $10.4^0/_{00} = 4\%$ größerer Wert, d. i. 8320 m, einzusetzen; oder bequemer, die 43 mm Druckabnahme sind um 4%, d. i. 1,7 mm, zu verkleinern. Der Luftdruck ergibt sich dann zu 679 mm.

b) Wieviel Kubikmeter Gas gibt der anfangs prall gefüllte Ballon ab? Da ein Gasvolumen bei Erhebung um 1 m sich um $\frac{1}{8000}$ ausdehnt, beträgt das abgegebene Gasvolumen $600 \cdot \frac{480}{8000} = 36$ cbm; oder bequemer, da $480 = 6.80$, 6% von $600 = 36$ cbm. [Dies Volumen angefüllt mit Gas vom Drucke $b = 677$ mm!] Beträgt die Lufttemperatur 10^0, so verkleinern (!) sich die 36 cbm um $10.4^0/_{00} = 4\%$ auf 34,5 cbm, angefüllt mit Gas $b = 679$ mm und der Temperatur 10^0.

Beispiel 5. Der Parsevalballon in 100 m Höhe mit 13 $\frac{\text{m}}{\text{sec.}}$

über Berlin fahrend erleide einen Luftwiderstand von 250 kg. Wie groß ist dieser, wenn die Fahrt mit derselben Geschwindigkeit in 900 m Höhe verläuft? — Der Luftwiderstand nimmt bei der Steigung um 800 = 10.80 m um 10% seines Wertes, d. s. 25 kg, ab. Da der Abnahme des Widerstandes um 10% eine Zunahme der Geschwindigkeit um 5% entspricht, falls die Zugkraft der Schraube dieselbe bleibt, so würde unter letzterer Voraussetzung die Geschwindigkeit um $0{,}65 \frac{\text{m}}{\text{sec.}} = 2{,}3 \frac{\text{Kilometer}}{\text{Stunde}}$ steigen. Bei Steigung um 1600 m würde der Widerstand um rund 50 kg abnehmen und bei gleicher Zugkraft der Schrauben die Geschwindigkeit um $4{,}7 \frac{\text{Kilometer}}{\text{Stunde}}$ steigen.

Beispiel 6. In der Gondel eines Ballones, der München (hier $b = 714$ mm) passiert, zeigt das Aneroid 556 mm. Wie groß ist die Höhendifferenz? Da bei Erhebung um 1 m der Druck um $\frac{1}{8000}$ abnimmt, entspricht 1 m Erhebung unten einer Druckabnahme von $\frac{714}{8000}$, oben von $\frac{556}{8000}$, im Mittel also von $\frac{1}{2}\left[\frac{714}{8000} + \frac{556}{8000}\right] = \frac{635}{8000}$ mm. Ein Millimeter Druckunterschied entspricht deshalb im Mittel einem Höhenunterschied von $\frac{8000}{635}$ m, die beobachtete Druckdifferenz von $714 - 556 = 158$ mm somit einem solchen von $158 \cdot \frac{8000}{635} = 1990$ m. [Die barometrische Höhenformel ergibt 2006 m; eine Höhendifferenz von 16 m aber ergibt sich schon, wenn die mittlere Temperatur diese Luftsäule um $1\frac{1}{2}^0$ unrichtig angesetzt wird.] Die mittlere Temperatur der zu messenden Luftsäule wurde zu 0^0 angenommen; beträgt sie 8^0, so vermehrt sich die Höhe um 8.4‰ = 3,2% von 1990, das sind 64 m.

§ 3. Die Höhenzahl.

Das eben erläuterte Gesetz, daß bei Erhebung um 1 m der Druck der Atmosphäre um $\frac{1}{8000}$, bei Erhebung um 80 m um 1% seines Wertes abnimmt, gestattet, die meisten der sich darbietenden Aufgaben durch Kopfrechnen zu überschlagen oder mit Hilfe des Rechenschiebers mit einer Genauigkeit zu lösen, die für die Praxis völlig ausreicht. Es darf eben nicht vergessen werden, daß gegebenen Falls die meisten der zur Rechnung notwendigen Daten, in erster Linie Temperatur des Füllgases, Temperaturverteilung in der Atmosphäre, Dichte des Leuchtgases,

Volumen des durch angehängte Last deformierten Ballones etc. nicht mit der nötigen Genauigkeit bekannt sind und dadurch die Genauigkeit einer Formel nicht ausgenützt werden kann. Auch wird dem Ballonführer die Möglichkeit einer raschen Überschlagsrechnung weit wertvoller sein als die Exaktheit umständlichen Rechnens.

Die weitgehendste Vereinfachung der Rechnung bei vollständiger Ausnützung der Exaktheit der Formel und ein rascher Überblick über die quantitativen Verhältnisse wird ermöglicht durch die *Tabelle der Höhenzahlen.*

Tabelle der Höhenzahlen.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,0	—	79	158	236	313	390	466	541	615	689	762
1,1	762	834	906	977	1 047	1 117	1 186	1 255	1 323	1 390	1 457
1,2	1 457	1 524	1 590	1 654	1 718	1 782	1 846	1 910	1 973	2 035	2 097
1,3	2 097	2 158	2 219	2 279	2 338	2 397	2 456	2 515	2 573	2 631	2 688
1,4	2 688	2 745	2 802	2 858	2 913	2 969	3 025	3 080	3 134	3 187	3 240
1,5	3 240	3 293	3 346	3 398	3 450	3 502	3 553	3 604	3 655	3 705	3 755
1,6	3 755	3 805	3 854	3 903	3 952	4 001	4 049	4 098	4 146	4 193	4 239
1,7	4 239	4 286	4 333	4 379	4 425	4 471	4 517	4 563	4 608	4 653	4 698
1,8	4 698	4 742	4 786	4 829	4 872	4 916	4 959	5 002	5 045	5 088	5 130
1,9	5 130	5 172	5 213	5 255	5 296	5 337	5 378	5 419	5 459	5 499	5 539
2	5 539	5 929	6 301	6 656	6 996	7 321	7 636	7 936	8 227	8 508	8 779
3	8 779	9 041	9 294	9 540	9 778	10 010	10 237	10 455	10 669	10 876	11 078
4	11 078	11 270	11 468	11 656	11 840	12 019	12 195	12 367	12 535	12 700	12 860
5	12 860	13 020	13 175	13 327	13 475	13 622	13 766	13 908	14 047	14 185	14 318
6	14 318	14 452	14 580	14 708	14 833	14 957	15 079	15 200	15 317	15 434	15 549
7	15 549	15 663	15 776	15 885	15 924	16 101	16 208	16 312	16 415	16 517	16 617
8	16 617	16 715	16 814	16 915	17 007	17 099	17 195	17 287	17 379	17 470	17 560
9	17 560	17 646	17 734	17 820	17 906	17 990	18 074	18 157	18 239	18 319	18 399
10	18 399	18 478	18 577	18 635	18 712	18 789	18 865	18 940	19 014	19 088	19 161
11	19 161										
12	19 857										
13	20 496										
14	21 088										
15	21 639										
16	22 156										
18	23 099										
20	23 938										
22	24 700										
24	25 396										

Der Höhenunterschied zweier Orte A und B, die durch die Luftdrucke b_A und b_B mm charakterisiert sind, ist gegeben durch die sogenannte „barometrische Höhenformel“

$$h_A - h_B = 8000\,(1 + \alpha t^0) \log \text{nat.} \frac{b_B}{b_A} \text{ Meter}$$

$$= 18\,400\,(1 + \alpha t^0) \log \frac{b_B}{b_A} \text{ Meter.}$$

t^0 bezeichnet die mittlere Temperatur der zwischen beiden Orten liegenden atmosphärischen Schichten. Das Druckverhältnis $\frac{b_B}{b_A}$ nennen wir eine Höhenzahl und bezeichen sie im folgenden mit n. *Eine Höhenzahl bestimmt somit die Höhendifferenz zweier Orte unabhängig von deren absoluter Höhe.* Höhenzahlen in genügend dichter Folge nebst den zugehörigen Höhendifferenzen sind für $t = 0^0$ in der folgenden Tabelle der Höhenzahlen angegeben. Beträgt die Temperatur t^0, so sind die Höhen sinngemäß (vgl. § 2) um $t \cdot 4\text{‰}$ ihres Wertes zu korrigieren.

Bestimmen 2 Höhenzahlen $n_A = \frac{b_A}{b_C}$ und $n_B = \frac{b_B}{b_C}$ die Höhenunterschiede zweier Orte A und B gegen einen dritten Ort C, so ist der Höhenunterschied zwischen A und B durch eine Höhenzahl $n = \frac{n_A}{n_B} \left(= \frac{b_B}{b_A}\right)$ bestimmt.

Die Tabelle der Höhenzahlen gibt somit die zwei verschiedenen Drucken entsprechende Höhendifferenz und ebenso das Verhältnis der beiden Drucke, die einer gegebenen Höhendifferenz entsprechen, *unabhängig von den absoluten Höhen.*

Beispiel 7. In der Gondel eines Ballones wird $b = 415$ mm abgelesen; der Druck am Erdboden beträgt 735 mm. Wie groß ist die Höhendifferenz? Wir bilden $n = \frac{736}{415} = 1{,}773$ und entnehmen der Tabelle der Höhenzahlen die Höhendifferenz 4576 m. Ist die mittlere Temperatur der Luftsäule $= 3^0$, so erhöht sich der Wert um $3 \cdot 4\text{‰} = 1{,}2\%$, das sind 50 m. Für fast alle Zwecke der Praxis genügt es, n mit Rechenschiebergenauigkeit zu bilden.

Beispiel 8. Ein geschlossener Gummiballon sei mit 1 cbm Gas gefüllt. Auf welches Volumen hat sich dies ausgedehnt, wenn der Ballon um 9000 m gestiegen? (Die Druckerhöhung der gespannten Ballonhülle als verschwindend klein angenommen.) Da wir (Formel 2) v oben : v unten $= b$ unten : b oben haben, so suchen wir die Höhenzahl $n = \frac{b \text{ unten}}{b \text{ oben}}$ der Höhendifferenz 9000 entsprechend und finden mit Hilfe der Tabelle 3,084. Das Gas hat sich auf das 3,084fache, also auf 3,084 cbm ausgedehnt. Steigt der Ballon um 9000 m weiter, so vergrößert sich das Volumen wieder um das 3,084fache; das Gas nimmt in 18000 m Höhe also ein Volumen von $3{,}084 \cdot 3{,}084 = 9{,}51$ cbm ein. (Die Tabelle der Höhenzahlen gibt zu 18000 m auch $n = 9{,}51$.)

Beispiel 9. Ein 1000 cbm-Ballon soll zu einer Alpenfahrt auf der kleinen Scheidegg ($h = 2064$ m) prall mit Wasserstoffgas gefüllt werden. Wieviel Flaschen komprimierten Gases sind zur Füllung erforderlich? Inhalt einer Flasche bei $b = 760$ mm

5 cbm. — Wir entnehmen der Tabelle für $h = 2064$ das zugehörige $n = 1{,}295$, bilden $\frac{1000}{1{,}295} = 770$ cbm und erhalten $\frac{770}{5} = 154$ Flaschen. Denn 770 cbm dehnen sich bei Erhebung um 2064 m um das 1,295fache, also auf 1000 cbm aus.

§ 4. Die Kräfte, die einen Ballon zum Steigen bringen, und die Beanspruchung der Hülle.

A. Der Mechanismus, der einen Ballon zum Steigen bringt, wird häufig gänzlich unrichtig dargestellt. Der in der Luft schwebende Ballon wird ohne weiteres verglichen mit einem unter Wasser getauchten, starren Körper; dieser Vergleich ist aber nur mit großer Vorsicht durchzuführen. Schwimmt ein Holzprisma vertikal unter Wasser, so genügt es, die auftreibende Kraft aufzufassen als die Differenz zweier Kräfte, welche auf die untere und obere Prismenfläche einander entgegenwirken, und ihre Differenz anzusetzen als Kraft, welche auf die Unterseite des Prismas wirkend dies nach oben zu drängen sucht. Die Oberflächlichkeit, diese Überlegung auf den weichen, mit offenem Füllansatz versehenen Ballon zu übertragen wird sofort augenfällig, wenn man statt des starren Holzes eine mit Luft gefüllte Blase unter Wasser gedrückt annimmt und diese dann an irgend einer Stelle ansticht. (Offener Füllansatz).

Wir betrachten einen bis an das untere Ende des offenen Füllansatzes mit Gas gefüllten Ballon, der mit seiner Last an irgend einer Stelle der Atmosphäre im Gleichgewichte schwebt. Ein Aneroid, am unteren Ende des offenen Füllansatzes abwechselnd in Gas und die unmittelbar unterliegende Luft eingetaucht, wird selbstverständlich denselben Druck p anzeigen, da die Grenze zwischen Luft und Gas sich nicht verschiebt, hier also keine Druckdifferenz wirkt. Erheben wir von dieser Stelle an unser Aneroid *neben* dem Ballon in der Atmosphäre, so wird der Druck, den es anzeigt, abnehmen, und zwar für jeden Meter Erhebung um $\frac{1}{8000}p$ (§ 2). In einer Höhe von h Meter über der Öffnung des Füllansatzes hat der Druck um $\frac{h}{8000}p$ abgenommen. In dieser Höhe wird die Ballonhaut *außen* von einem Drucke $p - \frac{h}{8000}p$ belastet, senkrecht zu ihrer Oberfläche; denn im Zustande der Ruhe wirkt ein Gasdruck immer senkrecht auf eine abgrenzende Wand. Führen wir andererseits das Aneroid *im Innern* des Ballones empor, so zeigt es ebenfalls eine Druckabnahme an, da es ja dabei immer mehr Gasmassen unter sich

läßt, deren Gewicht nicht mehr zur Geltung kommt; aber die Druckabnahme ist eine andere; nach § 2 pro Meter $\frac{s}{8000}p$, wenn s das spezifische Gewicht des Gases bedeutet; für Leuchtgas ($s = 0{,}46$) und Wasserstoffgas ($s = 0{,}069$) also wesentlich kleiner als für Luft. Für h Meter Erhebung beträgt sie $\frac{hs}{8000}p$, so daß in der Höhe h Meter über der Öffnung des Füllansatzes die Ballonwandung mit einem Druck $p - \frac{hs}{8000}p$ senkrecht *nach außen* gedrückt wird. In diesem Niveau wird die Ballonwandung mit einem Druck $p - \frac{hs}{8000}p$ senkrecht nach *außen*, mit einem Druck $p - \frac{h}{8000}p$ senkrecht nach *innen* gedrückt; es kommt somit ein Überdruck Δp *von innen nach außen* im Betrag n von $\frac{h}{8000}p - \frac{hs}{8000}p$ zur Wirkung. [$1 - s = 0{,}54$ für Leuchtgas, $= 0{,}931$ für Wasserstoffgas.] Wir haben somit den Satz:

Die Wandung eines im Gleichgewicht schwebenden, ganz gefüllten Ballones wird an jeder Stelle senkrecht nach außen gepreßt durch einen inneren Überdruck.

(6) $$\Delta p = \frac{hp}{8000}(1 - s) \text{ Kilogramm/Quadratmeter.}$$

Der Überdruck ist proportional der Höhe h über der Öffnung des Füllansatzes, sowie dem hier herrschenden Drucke p und nimmt deshalb 1% ab, so oft der Ballon um 80 Meter steigt. Die Art der Füllung kommt durch $1 - s$ zum Ausdruck.

Da nach Definition der homogenen Atmosphäre $p = 8000 \cdot \rho$ ist (§ 2), so wird der Überdruck auch gegeben durch die Beziehung

(6a) $$\Delta p = h\rho(1 - s) \text{ Kilogramm/Quadratmeter,}$$

worin ρ die Dichte der Luft bedeutet, welche das untere Ende des Füllansatzes umspült. Da ferner die Tragkraft T eines Kubikmeter Füllgases sich zu $\rho(1 - s)$ ergeben wird, erhalten wir für Δp auch den Ausdruck

(6b) $$\Delta p = hT \text{ Kilogramm/Quadratmeter,}$$

worin T die Tragfähigkeit des Gases am unteren Ende des Füllansatzes bedeutet.

Diese Überdrucke sind in Fig. 1 nach Richtung und Größe dargestellt; T ist zu 1 Kilogramm angenommen, Δp und h sind durch die gleiche Längeneinheit gemessen. Die Länge des Füllansatzes ist $= 1/_{10}$ Ballondurchmesser angenommen.

Durch diese Überdrucke, die Art der Anhängung der getragenen Last, den Zuschnitt der Ballonhaut und deren Elastizitätsverhältnisse ist die Form des gefüllten Ballons bestimmt.

Diese Überdrucke sind (s. unten § 6) die Kräfte, welche den Ballon emporheben; wie ein Blick auf die Fig. 1 zeigt, sind sie ganz anders verteilt wie die Kräfte, welche an der Oberfläche eines unter Wasser schwimmenden festen Körpers angreifen.

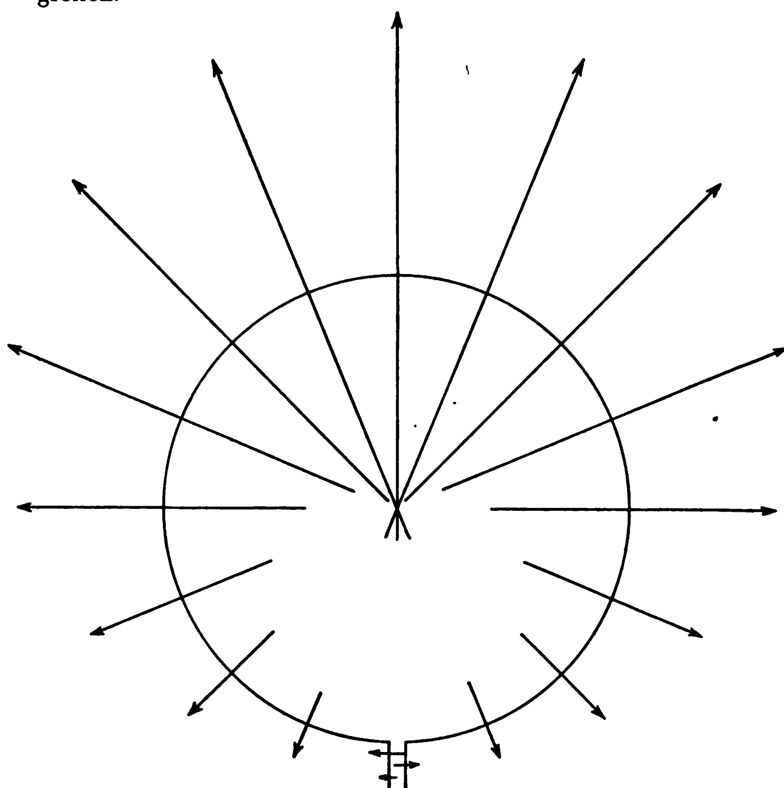


Fig. 1.

B. Wir denken uns den Ballon an irgend einer Stelle in einer Länge von 1 Meter aufgeschnitten; damit der Schnitt nicht klafft und das Gas nicht entweicht, müssen die Schnittränder mit einer gewissen Kraft zusammengehalten werden. Diese Kraft nennt man die Spannung der Hülle senkrecht zur Schnittrichtung und mißt sie in Kilogramm pro Meter. Sie ist an jeder Stelle bestimmt durch den hier herrschenden Überdruck Δp, die Ver-

teilung von Δp in deren Umgebung, die Form der Hülle und die Richtung, in welcher wir den gedachten Schnitt anlegen. Für eine nach allen Richtungen gleichmäßig beanspruchte, kugelförmige Hülle ist an einer Stelle die Spannung S, unabhängig von der Richtung, abhängig von dem Radius R durch die Beziehung:

(7) $$S = \Delta p \cdot \frac{R}{2} = h\mathsf{T} \cdot \frac{R}{2} \text{ Kilogramm/Meter.}$$

Bei einem Ballon mit Netz kann die Beanspruchung der Hülle bis etwa 30° Abstand vom Ventil als gleichmäßig betrachtet werden.

Daß die Spannung mit der Tragkraft T des Gases und der Höhe h über der Öffnung des Füllansatzes zunimmt, ist ohne weiteres einleuchtend; darzulegen, daß die Gestalt und Art der Beanspruchung der Hülle von fundamentaler Bedeutung ist, würde hier zu weit führen. Je flacher die Hülle, desto leichter reißt sie; wie auch eine gespannte Violinsaite um so leichter reißt, je weniger der Einwirkung des Bogens folgend sie sich ausbaucht. Durch Zerreißproben ergab sich, daß doppelter gummierter Stoff, wie er in der Regel zum Bau von Freiballonen benützt wird, erst bei einer Beanspruchung von mehr als 1000 kg/m reißt; um aber sicher zu gehen, nehmen wir diesen Wert der Reißfestigkeit an. Überschreitet deshalb an irgend einer Stelle der Überdruck Δp einen gewissen Wert Δp_s, der nach Formel (7) gegeben ist durch

(8) $$\Delta p_s = \frac{2000}{R} \text{ kg/m}$$

$$= \frac{147}{R} \text{ mm Quecksilber,}$$

so wird an dieser Stelle der Ballon sicher platzen, falls dies nicht schon früher an einer Stelle ungleichförmiger Stoffbeanspruchung sich ereignet. In der folgenden kleinen Tabelle sind für einige Ballongrößen diese Platzdrucke Δp_s angegeben.

Tabelle der Platzdrucke.

V Kubikmeter	R Meter	$\Delta p_s \frac{\text{Kilogramm}}{\text{Quadratmeter}}$	Δp_s Millimeter Quecksilber
600	5,25	380	28
1000	6,2	322	23,5
1440	7	286	21
2200	8,1	247	18

Ungleiche Beanspruchung der Hülle würde diese Platzdrucke erniedrigen.

Es sei daran erinnert, daß ein Druck von 1 kg/qm gleich ist dem Drucke von 1 mm Wasser.

Beispiel 10. Ein Ballon von 1440 cbm sei mit Leuchtgas, $T = 0{,}7$ gefüllt. Die Last sei mittelst eines Traggurtes längs des Äquators aufgehängt. Die Länge des Füllansatzes sei gleich $^1/_{10}$ Ballon Durchmesser = 1,4 m.

Wie vielfache Sicherheit gegen Platzen gewährt der Ballon? Der höchste Punkt im Ballon liegt $14 + 1{,}4 = 15{,}4$ m über dem unteren Ende des Füllansatzes; hier herrscht der größte Überdruck im Betrage von $0{,}7 \cdot 15{,}4 = 11$ kg/qm = 11 mm Wasser = 0,84 mm Quecksilber. Die Sicherheit gegen Reißen ist demnach $\frac{286}{11} = 26$ fach. Mit Wasserstoff wäre sie noch $\frac{286}{18{,}5} = 15\,^1/_2$ fach. Sie nimmt um 1% zu, so oft der Ballon um 80 m steigt. Beim 2200 m-Ballon sind diese Sicherheiten 20, resp. 11,5 fach. Durch Auflegen des Netzes, werden die an und für sich schon großen Sicherheiten beträchtlich erhöht, da ein Teil der Spannung durch das Netz aufgenommen wird.

Da im höchsten Punkte des Ballons h nahezu (ohne Füllansatz genau) gleich $2R$ ist, so steigt die maximale Spannung nahezu quadratisch mit dem Ballonradius.

Beispiel 11. Ein Ballon von 1440 cbm aus doppeltem, gummiertem Stoff sei bei einem Barometerstand 760 mm mit Leuchtgas $T = 0{,}7$ gefüllt. Der Ballon steige mit zugebundenem Füllansatze. In welcher Höhe wird derselbe platzen? Am höchsten Punkte des Ballons beträgt der Überdruck 11 kg/qm. (Vgl. Beispiel 10). Der Ballon platzt spätestens bei einem Überdrucke von 286 kg/qm. Die Hülle sei unausdehnbar; dann bleibt beim Steigen das Ballonvolumen und dadurch auch der Druck im Innern an jeder Stelle ungeändert. Das Platzen tritt demnach spätestens ein, wenn der Außendruck um $286 - 11 = 275$ kg/qm abgenommen hat. Am Aufstiegsort beträgt der Luftdruck 10330 kg; er nimmt für jeden Meter Erhebung um $\frac{1}{8000}$, das sind $\frac{10{,}3}{8}$ kg ab; für $\frac{8}{10{,}3}$ m Erhebung um 1 kg. Nach einer Erhebung um $275 \cdot \frac{8}{10{,}3} = 214$ m wird deshalb Platzen eintreten. Nun ist aber in seinen höchsten Partien der Ballon durch das Netz außerordentlich gefestigt; da wo das Netz die Hülle verläßt, beträgt der Überdruck etwa 5 kg/qm. Damit der Ballon an dieser Stelle platzt, muß der Außendruck noch um weitere $11 - 5 = 6$ kg abnehmen; dazu genügt ein Weitersteigen um 5 m. Nach weiteren 4 m Erhebung würde der Füllansatz platzen können, also die Stelle, die bei der Abfahrt gar nicht beansprucht war. (Dabei haben wir angenommen, daß dieser wachsende innere Druck die Beanspruchung auch der tieferen Partien der Hülle immer gleichmäßiger macht).

Die Steighöhen, bei denen Platzen eintritt, betragen bei einem 600 cbm-Ballon mit Wasserstofffüllung etwa 300 m, bei 1000 cbm mit Wasserstoffgas etwa 250 m und bei einem Volumen von 2200 cbm mit Leuchtgasfüllung nur etwa 200 m. Nimmt man eine Steiggeschwindigkeit von etwa 3 m/sek. an, so sind diese Höhen schon nach 2—3 Minuten erreicht. In Wirklichkeit ist der Ballonstoff nicht völlig unausdehnbar. Er gibt beim Steigen den wachsenden Überdrucken nach, und das zunehmende Ballonvolumen läßt den inneren Überdruck langsamer ansteigen. Ein Ausdehnen des Stoffes um 1% linear vergrößert das Volumen um 3%; zum Platzen muß der Druck außen um 3% mehr abnehmen, was nach einem Weitersteigen um $3 \cdot 80 = 240$ m eintritt.

Das Steigen eines Ballons mit geschlossenem Füllansatze muß deshalb unter allen Umständen vermieden werden, da nach wenigen Minuten Steigens bereits die Gefahrzone erreicht ist. Tritt aus Versehen der Fall ein, daß ein Ballon mit nicht geöffnetem Füllansatze hoch geht, so muß sofort kräftig und dauernd Ventil gezogen und so rasch wie möglich zur Landung geschritten werden, falls es nicht gelingt, den Füllansatz zu öffnen.

Beispiel 12. Ein Ballon werde in der Halle prall gefüllt, mit zugebundenem Füllansatze ins Freie transportiert und der Sonnenstrahlung ausgesetzt. Um wieviel Grad muß die mittlere Temperatur des Gases steigen, damit Platzen eintritt? Wir nehmen als Beispiel den 1440 cbm-Ballon. Zum Platzen muß der Innendruck um ca. 275 kg steigen; das sind 2,6% des Anfangsdruckes von 10330 kg; 1° Temperatursteigerung bewirkt eine Druckerhöhung von 0,4%; die verlangte Temperatursteigerung beträgt also nur $6\frac{1}{2}°$. Durch weitere $7\frac{1}{2}°$ werden noch je 3% Volumenvermehrung durch Ausdehnung des Ballonstoffes ausgeglichen. Prall gefüllte, mit zugebundenem Füllansatze der Sonnenstrahlung ausgesetzte Ballone müssen deshalb beaufsichtigt und von Zeit zu Zeit durch Ventilzug entlastet werden.

C. Wird ein gefüllter Ballon an irgend einer Stelle angestochen, so folgt das Gas dem an dieser Stelle herrschenden Überdrucke und strömt aus. Der Überdruck, an Stärke abnehmend, hält an, so lange sich noch tiefer liegende Gasmassen vorfinden. Alle tiefer liegenden Gasmassen werden deshalb durch die verletzte Stelle entweichen; die durch die Verletzungsstelle gelegte Horizontalebene wird schließlich die Ebene, an welcher Gas und Luft unter gleichem Drucke sich berühren. Unterhalb derselben wird die Ballonhülle lediglich durch ihr Eigengewicht gespannt, oberhalb herrschen noch Überdrucke und Spannungen, die sich nach Formel 6 berechnen lassen, wobei aber für h die Höhe über der erwähnten Horizontalebene einzusetzen ist. Den neuen Verhält-

nissen sich anpassend hat sich die Gestalt des Ballones geändert, der Ballon bekommt Falten, denn eine unausdehnbare Hülle, die auf Kugelform zugeschnitten wurde, ist nur in Kugelform frei von Falten. Ein Herabsinken des Ballones unter seine Prallhöhe verrät sich dem aufmerksamen Führer äußerst rasch dadurch, daß seine untersten Partien, namentlich der Füllansatz, den inneren Überdruck verlieren und schlaff werden.

Bildet der Ballon einen Kreiszylinder vom Radius R, so beträgt bei *gleichmäßiger* Beanspruchung der Hüllen die Spannung quer zur Längsachse immer noch $\Delta p \cdot \frac{R}{2}$; in Richtung derselben aber ist sie von doppeltem Betrage. Ist die Länge des Zylinders aber mehrmals größer wie der Radius, so wird die Hülle quer zur Längsrichtung ungleich stärker beansprucht, so daß beim Platzen eines Lenkballones sich der Riß in Längsrichtung ausbildet.

§ 5. Das Ausströmen der Gase. Ventilwirkung.

Bei Ventilzug und bei Verletzungen der Ballonhülle strömt das Gas aus mit einer Geschwindigkeit, die bedingt ist durch den Überdruck an der Öffnungsstelle und die Dichte des Gases. Sind an der Stelle, wo die Druckdifferenz Δp wirksam ist, im Mittel der Druck p und die Dichte ρ, so ist, wenn $g = 9{,}81$ die Anziehungsbeschleunigung der Erde bedeutet, die Ausströmungsgeschwindigkeit

$$(9) \qquad V = \sqrt{2g\frac{\Delta p}{\rho}} = \frac{396}{\sqrt{s}}\sqrt{\frac{\Delta p}{p}} \text{ Meter/Sekunden.}$$

Diese Formel liefert noch bei $\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{20}$; (z. B. $p = 760$ mm, $\Delta p = 40$ mm) die Ausströmungsgeschwindigkeit bis auf etwa 1% richtig. Wir stellen für $p = 760$ mm folgende kleine Tabelle zusammen:

Tabelle der Ausströmungsgeschwindigkeiten I.

Δp	V Meter/Sekunden Luft	Leuchtgas	Wasserstoffgas
1 mm Wasser	3,9	5,9	14,9
2 „ „	5,5	8,4	21,0
4 „ „	7,8	11,7	29,7
7 „ „	10,3	15,7	39,3
10 „ „	12,3	18,7	46,9
1 mm Quecksilber	14,4	21,9	54,8
2 „ „	20,3	30,9	77,3
3 „ „	24,9	37,8	94,8
4 „ „	28,7	43,6	109
5 „ „	32,1	48,7	122

Führen wir in Formel (9) das Δp der Formel (6a) $\Delta p = h\rho(1-s)$ ein, worin ρ sich auf atmosphärische Luft am Füllansatze bezog, und ersetzen den Quotienten $\frac{\rho\,\text{Luft}}{\rho\,\text{Gas}}$ durch $\frac{1}{s}$, so ergibt sich

(10) $$V = \sqrt{2gh\frac{1-s}{s}} \text{ Meter/Sekunden.}$$

worin h die Höhe der Öffnungsstelle über der unteren Gasgrenze bedeutet. Das Volumen des ausströmenden Gases ergibt sich durch Multiplikation mit dem Ausströmungsquerschnitt. Wir sehen:

Die Ausströmungsgeschwindigkeit ist unabhängig von der Höhe, in welcher der Ballon schwebt. Wird in verschiedenen Höhen das Ventil durch gleiche Zeiten gleichweit geöffnet, so ist die Anzahl ausströmender Kubikmeter unabhängig von der Höhe; die ausströmende Masse aber nimmt um 1⁰/₀ ab, so oft der Ballon um 80 m steigt.

Folgende kleine Tabelle gibt die Ausströmungsgeschwindigkeiten in ihrer Abhängung von der Höhe h der Ausströmungsöffnung über der unteren Gasgrenze.

Tabelle der Ausströmungsgeschwindigkeiten II.

	Geschwindigkeit V Meter/Sekunden	
Höhe h	Leuchtgas	Wasserstoffgas
1	5	16,3
2	7,1	23,0
4	10	32,5
6	12,4	39,9
8	14,3	46,0
10	16,0	51,5
12	17,5	56,5
16	20,0	65,0
20	22,6	72,0

Aus diesen Zahlen folgt mit genügender Genauigkeit der Satz: *Bei gleicher Höhe h der Öffnungsstelle strömt Wasserstoffgas dreimal rascher aus wie Leuchtgas.*

Beispiel 13. Ventilwirkung bei Ballonen verschiedener Größe und gleicher Füllung. Die Höhe h des Ventils beim prall gefüllten Ballon ist gleich dessen Durchmesser plus der Länge des Füllansatzes. Setzen wir dessen Länge gleich $\frac{1}{10}$ Ballondurchmesser, so ergibt sich dies größte h für den

600 cbm-Ballon zu	10,5	+ 1	= 11,5	m
1000 „ „ „	12,4	+ 1,2	= 13,6	„
1440 „ „ „	14	+ 1,4	= 15,4	„
2200 „ „ „	16	+ 1,6	= 17,6	„.

Suchen wir die zugehörigen Ausflußgeschwindigkeiten in der obenstehenden Tabelle, so sehen wir, daß das Volumen von sehr geringem Einfluß ist; es geht ja in Formel (10) nur in der Potenz $^1/_6$ ein. *Für alle Zwecke der Praxis genügt es vollauf, von der Ballongröße abzusehen und die Ausströmungsgeschwindigkeit bei Ventilzug für Leuchtgas zu 20 m/sek., für Wasserstoffgas zu 60 m/sek. anzusetzen, gänzlich unabhängig von der Höhe, in welcher der Ballon schwebt. Der Führer beachte, daß bei gleicher Ventilöffnung und gleicher Dauer des Ventilzugs große und kleine Ballone gleich viel an Steigkraft, absolut genommen, verlieren.* Sollen ungleiche Ballone ihre Tragkraft um gleichviel Prozent vermindern, so muß die Dauer des Ventilzuges proportional dem Ballonvolumen sein (genauer gleich dem Ballondurchmesser in der Potenz $\frac{5}{2}$, falls die Länge des Füllansatzes vernachlässigt wird). Da ferner der Luftwiderstand sinkender Ballone bei gleicher Sinkgeschwindigkeit proportional dem Ballonquerschnitt ist, so muß diesem proportional die Dauer gleichstarken Ventilzuges sein, falls im Gleichgewicht schwebenden Ballonen gleiche Sinkgeschwindigkeit erteilt werden soll. Bei den vier oben angegebenen Ballongrößen verhalten sich die Querschnitte wie 1 : 1,4 : 1,8 : 2,3.

Beispiel 14. Ventilwirkung bei Ballonen verschiedener Füllung. Unabhängig von der Ballongröße genügt es, wie oben dargelegt, die Ausflußgeschwindigkeit zu 20 m/sek. für Leuchtgas und 60 m/sek. für Wasserstoffgas anzunehmen; ein Leuchtgasballon verliert deshalb pro Quadratdecimeter Öffnungsfläche in der Sekunde $^1/_5$, ein Wasserstoffballon $^3/_5$ cbm Gas, unabhängig von Größe und Flughöhe. Der Führer beachte, daß derselbe *prozentische* Auftriebsverlust beim Wasserstoffballon dreimal rascher eintritt wie beim Leuchtgasballon. Derselbe *absolute* Auftriebsverlust ist beim Wasserstoffballon aber in verhältnismäßig noch kürzerer Zeit erreicht; denn das Verhältnis 1 : 3 ist noch zu multiplizieren mit dem Tragkraftsverhältnis von Leuchtgas zu Wasserstoffgas, 0,7 : 1.2, und steigert sich deshalb auf 1 : 5. Je nach der beabsichtigten Wirkung reagiert der Wasserstoffballon auf gleichen Ventilzug drei- resp. fünfmal stärker wie der Leuchtgasballon. Der Führer, der gewohnt ist, im Leuchtgasballon zu fahren, sei vorsichtig, wenn er durch Ventilzug den Wasserstoffgasballon zum Sinken bringen will; bei gleicher Dauer des Ventilzuges erfordert der Wasserstoffballon die fünffache Menge Bremsballast wie der Leuchtgasballon.

Beispiel 15. Verletzungen der Hülle durch Schüsse. Eine Verletzung der Hülle wirkt um so gefährlicher, je näher sie dem Ventil benachbart ist; je höher im Ballon sie sitzt, desto größer die Ausströmungsgeschwindigkeit und desto größer der resultie-

rende Gasverlust, da alles tiefer gelegene Gas ausströmt. Dabei ist zu beachten, daß das Ausströmen mit abnehmender Geschwindigkeit erfolgt; denn mit steigender unterer Gasgrenze nimmt die Druckhöhe h der Formel (10) ab. Um diesen Einfluß abzuschätzen, diene die Angabe, daß die Zeit, die ein Ballon zu seiner Entleerung durch das Ventil braucht, $^8/_5$mal so groß ist wie die Zeit, die erforderlich wäre, falls der anfängliche Überdruck konstant bliebe; die Zeiten, in denen sich dabei die untere und obere Ballonhälften entleeren, verhalten sich wie $2:3$. Sind eine Anzahl Schüsse gleichmäßig über den Ballon verteilt, so denken wir sie zur Abschätzung ihrer Wirkung in einer Höhe h ungefähr gleich $^2/_3$ des Ballondurchmessers vereinigt und setzen (vgl. die Tabelle der Ausströmungsgeschwindigkeit II) die Ausströmungsgeschwindigkeit für Leuchtgas zu 15, für Wasserstoffgas zu 45 m/sek. an (der schließliche Gasverlust aber ist durch die höchste Verletzungsstelle bestimmt). Ist die Verletzungsstelle 1 qcm groß, so ist der Gasverlust bei Leuchtgas 1,5, bei Wasserstoffgas 4,5 l in der Sekunde. 1 cbm Gas entweicht in rund 11 resp. $3^2/_3$ Minuten; ein Tragkraftsverlust von 1 kg wird in rund 16 resp. 3 Minuten eintreten und kann durch 1 Sack Ballast von 12 kg 3 Stunden 10 Minuten resp. 37 Minuten lang kompensiert werden. Die Ein- und Austrittsstelle eines 7 mm Geschosses geben zusammen eine Ausströmungsfläche von 0,77 qcm. Der Auftriebsverlust durch diese Schußverletzung kann deshalb durch 12 kg Ballast beim Leuchtgasballon 4 Stunden 7 Minuten, beim Wasserstoffballon 48 Minuten lang kompensiert werden und wird deshalb kaum von Bedeutung sein. Eine Garbe von 50 Geschossen würde diese Zeiten auf 5 resp. 1 Minute reduzieren; 10 Sack Ballast zu 12 kg würden dem Leuchtgasballon immer noch eine Flugzeit von 50 Minuten ermöglichen. Eine 7 cm Granate öffnet ebenso stark wie 100 Geschosse von 7 mm. Handelt es sich darum, einen Ballon durch eine durch Gewehrfeuer gefährdete Zone hindurchzubringen, so erweist sich der Leuchtgasballon dem Wasserstoffballon ganz außerordentlich überlegen; ein rasches Herunterholen desselben durch Gewehrfeuer dürfte nur in den seltensten Fällen sich ereignen. Der Wasserstoffballon wird zwar in der Regel mehr verfügbaren Ballast mit sich führen, aber nicht im Verhältnis 5 : 1, was nötig wäre, um die Schußwirkung auszugleichen.

Beispiel 16. Kann ein Ballon dadurch gefährdet werden, daß bei zu raschem Steigen der geöffnete Füllansatz das sich ausdehnende Gas nicht rasch genug entweichen läßt? Wir wählen als Beispiel den 1440 cbm-Ballon; er sei abgewogen, und es werde ihm eine Steigkraft von 100 kg gegeben, indem etwas über 8 Sack Ballast abgeworfen werden. Wir werden sehen

(§ 17), daß selbst in diesem Falle die Steiggeschwindigkeit nicht ganz 5 m/sek. beträgt. Um 1% der Füllung, 14 cbm, zu verlieren, muß der Ballon 80 m steigen, was 16 Sekunden in Anspruch nimmt; es treten somit in der Sekunde $^7/_8$ cbm Gas aus. Der Füllansatz habe bei einer Länge von $^1/_{10}$ Ballondurchmesser einen Durchmesser von $^1/_3$ seiner Länge, das sind 47 cm, was einer Öffnung von $^1/_6$ qm entspricht. Daraus folgt, daß die Geschwindigkeit, mit der das Gas diese Öffnung passiert, knapp 5 m/sek. beträgt, eine Geschwindigkeit, die nach der Tabelle der Seite 16 bei Leuchtgas schon durch eine Druckdifferenz von 2 mm Wasser erzeugt wird. Durch Ballongröße und größeren Ballastauswurf werden diese Verhältnisse wenig geändert. Selbst wenn der Ballon durch einen Wirbelsturm mit 30 m/sek. emporgerissen werden sollte, würde die Ausströmungsgeschwindigkeit durch den Füllansatz nur etwa 30 m/sek. betragen, die durch eine Druckdifferenz von 2 mm Quecksilber erzeugt wird. Selbst bei noch bedeutend größeren vertikalen Sturmgeschwindigkeiten werden bei einem Durchmesser des Füllansatzes gleich $^1/_{30}$ Ballondurchmesser kaum Beanspruchungen der Hülle durch vermehrten Innendruck auftreten, die gefährlich werden. Daß Ballone durch vertikale Stürme emporgeschleudert wurden, hat sich schon mehrmals ereignet. Instinktiv wird in solchen Fällen der Führer wahrscheinlich kräftig Ventil ziehen. Ich halte dies nicht für zweckmäßig. Gegen den hebenden Sturm ist nicht anzukämpfen; die absolute Vertikalgeschwindigkeit des Ballones wird nur unmerklich gehindert. Erlahmt aber der hebende Sturm, so können zuviel abgegebene Gasmassen sich unliebsam geltend machen.

In allen diesen Beispielen ist die Temperatur des Füllgases zu 0° angenommen. Für jeden Grad Temperaturerhöhung steigert sich die Ausflußgeschwindigkeit des Leuchtgases um etwa 4‰, diejenige des Wasserstoffgases um etwa 2‰; diese Änderungen sind ohne praktische Bedeutung.

§ 6. Auftrieb, Tragkraft und Steigkraft.

In § 4 haben wir gezeigt, daß jedes Element der Hülle durch einen inneren Überdruck belastet ist; in Fig. 1 sind diese Überdrucke nach Richtung und Größe dargestellt. Obwohl die gesamte Hülle unterhalb des Äquators nach *abwärts* gedrückt wird, so überwiegen doch, wie ein Blick auf die Figur unmittelbar lehrt, die Drucke nach oben; die Summe aller Überdrucke ist die wirkende Kraft, welche die Hülle und damit den Ballon hebt und die, falls derselbe im Gleichgewicht schwebt, durch das getragene Gewicht (exklusive Gasgewicht!) äquilibriert wird. Wir nennen die Summe dieser Überdrucke deshalb die *Tragkraft.* Diese

Summe läßt sich mit verhältnismäßig einfachen, rechnerischen Mitteln bilden; wir schlagen aber, um sie zu erhalten, ein anschaulicheres Verfahren ein.

An jeder Stelle ist der Überdruck gleich dem Überschuß des Druckes innen über den Druck außen. Wir erhalten deshalb die Tragkraft, wenn wir die Summe bilden aller Drucke, welche die Hülle von innen belasten, und davon die Summe aller Drucke, welche die Hülle von außen belasten, abziehen.

Die Summe aller Drucke, welche die Hülle von *außen* belasten, nennen wir den *Auftrieb;* seine Größe finden wir, wie folgt: Die Hülle, welche das Gas umschließt, denken wir uns starr, gewichtslos und statt des Gases angefüllt mit atmosphärischer Luft der Umgebung, die ihren Druck durch eine Öffnung, die wir schließen, mit der umgebenden Atmosphäre ausgeglichen hat. Die eingeschlossene Luft stimmt dann mit der verdrängten Luft vollständig überein, die Gewichte eingeschlossener und verdrängter Luft sind gleich. Die außen auf der Hülle lastenden Drucke sind dieselben geblieben; ihre Summe, der Auftrieb, hat sich nicht geändert und läßt sich sofort angeben. Denn die Hülle samt Inhalt, die im luftleeren Raume einer Kraft gleich dessen Gewichte folgend fallen würde, bleibt in Wirklichkeit schweben; dem Gewichte hält der Auftrieb das Gleichgewicht. Daraus folgt:

Schwebt an irgend einer Stelle der Atmosphäre eine unnachgiebige Hülle, so ist die Summe der außen auf ihr lastenden Drucke, der Auftrieb, nach oben gerichtet, und gleich dem Gewicht der verdrängten Luft.

Um die Drucke der Gasmasse auf die Innenseite der starr und gewichtslos gedachten Hülle zu summieren, denken wir uns die außen befindliche Luftatmosphäre entfernt und durch eine Gasatmosphäre ersetzt, die in jedem Niveau mit der eingeschlossenen Gasmasse übereinstimmen soll. Das eingeschlossene Gasgewicht ist dann gleich dem Gewichte der verdrängten Gasmasse, die Innendrucke sind an jeder Stelle gleich den Außendrucken, aber entgegengesetzt gerichtet. Die Summe der Außendrucke ergibt wie vorhin eine Kraft senkrecht nach oben, an Größe gleich dem Gasgewichte. Wir finden somit:

Die Summe aller Innendrucke ist an Größe und Richtung gleich dem Gewichte der eingeschlossenen Gasmassen, nach unten gerichtet.

Die Größe, auf die es ankommt, die Tragkraft, ist demnach durch folgendes *Grundgesetz* gegeben:

Die Tragkraft einer an irgend einer Stelle der Atmosphäre im Gleichgewicht schwebenden Gasmasse ist gleich dem Auftriebe minus dem Gewichte des Gases. Der Auftrieb ist an Größe gleich und an Richtung entgegengesetzt dem Gewicht der verdrängten Luftmasse.

Das gibt die **Fundamentalformel:**

(11) *Tragkraft einer Gasmasse = Auftrieb — Gasgewicht.*

Anmerkung. Wir sprechen stets von der Tragkraft einer Gasmasse, nicht von derjenigen eines Ballones.

Damit eine Gasmasse in konstanter Höhe schweben bleibt, muß der nach oben gerichteten Tragkraft durch eine gleich große nach abwärts gerichtete Kraft das Gleichgewicht gehalten werden. Letztere ist beim Freiballon gegeben durch das Gewicht aller von der Gasmasse gehobenen Teile. Die Gasmasse kann, ohne ihre Höhenlage zu ändern, belastet werden mit einem Gewicht, bestehend aus Hülle und allem, was die Hülle trägt, gleich ihrer Tragkraft. Ist die Belastung geringer, so hebt die Gasmasse diese höher empor, im entgegengesetzten Falle folgt sie dem größerem Zuge nach unten.

Die Differenz Tragkraft minus Belastung nennen wir, falls sie positiv ist, Steigkraft, falls sie negativ ist, Sinkkraft.

Anmerkung. Wir haben hier absichtlich den Ausdruck Belastung und nicht kurzweg Last oder angehängte Last gewählt, da in letzterer vielfach das Gewicht der Hülle oder das ganze Ballongewicht nicht mit eingerechnet wird. Überhaupt gibt es für die oben erläuterten Begriffe keine feststehende Nomenklatur. So gebraucht man das Wort Auftrieb mitunter in dem hier gegebenen Sinne, häufiger versteht man darunter das, was wir in Tragkraft und Steigkraft trennten. Steht der Ballon, von der Sonne durchwärmt, reich mit Ballastsäcken beladen, abgewogen da, so hat er „guten Auftrieb", nimmt man ihm 2 Sack ab, so hat er „2 Sack Auftrieb". (Wir würden sagen der Ballon trägt oder zieht gut, es werden ihm 2 Sack Steigkraft gegeben.) Im Einzelfalle ist das ohne Bedeutung, falls nur mit dem Worte der richtige Begriff verbunden wird; aber der Mangel feststehender Bezeichnungen erschwert oft die Darstellung und führt namentlich bei mündlichen Auseinandersetzungen leicht zu Mißverständnissen. Wir werden also scharf zwischen Auftrieb, Tragkraft und Steig- resp. Sinkkraft, unterscheiden.

Beispiel 17. Zwei Ballone von je 1000 cbm werden bei $b = 760$ mm und $t = 0^0$ mit Wasserstoff resp. Leuchtgas gefüllt. Beide Ballone haben denselben Auftrieb von $1000 \cdot 1{,}293 = 1293$ kg (= Gewicht der verdrängten Luft; vgl. Tabelle der Gaskonstanten). Aber die Füllung des Wasserstoffballones wiegt $1000 \cdot 0{,}089 = 89$ kg, die des Leuchtgasballones $1000 \cdot 0{,}59 = 590$ kg. Die Tragkraft der Wasserstoffmasse ist somit $1293 - 89 = 1204$, die des Leuchtgases $1293 - 590 = 703$ kg. Werden die beiden Gasmassen durch Hülle, Netz, Korb nebst Inhalt usw. gleich diesen Beträgen belastet, so sind die Ballone „abgewogen". Werden

beide Ballone um je 10 kg Ballast erleichtert, so haben beide dieselbe *anfängliche* Steigkraft von 10 kg. Beide steigen, bis die Differenz Auftrieb — Gasgewicht für jeden um 10 kg abgenommen hat, was, wie wir sehen werden, beim Wasserstoffballon in 66, beim Leuchtgasballon in 114 m Höhe der Fall ist. Die größte Tragkraft würde ein Ballon haben mit dem Gasgewicht Null; sie wäre dann gleich dem Auftrieb. Ein 1000 cbm Vakuumballon würde aber nur 89 kg mehr tragen können als ein gleich großer Wasserstoffballon. Da die Vorrichtungen zu nötigen Versteifungen ungleich mehr wiegen als das Gasgewicht, sind Bestrebungen zu dessen Herstellung gänzlich zwecklos.

§ 7. Einteilung der Ballone in zwei Klassen.

A. Wir schließen eine Gasmasse ein in eine Hülle der Art, daß sie bei Verschiebungen in vertikaler Richtung ungehindert dem veränderlichen Atmosphärendrucke folgend ihr Volumen ändern, nicht aber aus derselben entweichen kann. Wir nehmen dazu einen sogenannten „schlaffen", einen nur teilweise gefüllten Ballon, oder auch einen gechlossenen, außerordentlich leicht ausdehnbaren Gummiballon. Belasten wir gemäß Gleichung 11:

$$\text{Tragkraft} = \text{Auftrieb} - \text{Gasgewicht},$$

so ist er „abgewogen". Er werde in eine andere Höhenlage verschoben. Nach Annahme bleibt das Gasgewicht konstant, die Änderung der Tragkraft ist also gleich der Änderung des Auftriebs, des Gewichtes der verdrängten Luft. So oft wir 80 m auf- oder abschieben, nimmt das Volumen der konstant bleibenden Gasmenge und deshalb das Volumen der verdrängten Luft um $1\%_0$ zu oder ab; dabei nimmt der Luftdruck und infolgedessen (§ 1) das Gewicht des Kubikmeters verdrängter Luft um $1\%_0$ ab oder zu. Volumänderung und Dichteänderung heben sich auf, so daß der Auftrieb, und infolgedessen auch die Tragkraft, ungeändert bleiben. Dabei kann sich noch die Temperatur beliebig ändern, falls sie sich für Gas und verdrängte Luft um gleich viel ändert, so daß eine etwaige anfangs vorhandene Temperaturdifferenz konstant bleibt. Denn steigen die Temperaturen um je 1^0 an oder ab, so nimmt das Volumen der verdrängten Luft um $4\%_{00}$ zu oder ab, ihre Dichte aber um $4\%_{00}$ ab oder zu, so daß wieder Kompensation eintritt. Wir haben also den fundamentalen *Lehrsatz*:

Eine ihrem Gewichte nach unveränderliche Gasmasse hat in allen Höhen (bei allen Drucken) dieselbe Tragkraft, unabhängig von ihrer Temperatur, so lange die Temperaturdifferenz gegen die Umgebung konstant bleibt.

Wir können deshalb einen Ballon, der ein konstant bleibendes Gas*gewicht* enthält und an irgend einer Stelle richtig belastet im Gleichgewichte schwebt, beliebig verschieben, er wird an jeder Stelle „abgewogen“ bleiben, so lange das Temperaturgesetz nicht verletzt wird.

Gänzlich verschieden verhält sich ein Ballon, der ein konstant bleibendes Gas*volumen* umschließt, wie der prall gefüllte, mit offenem Füllansatz versehene Freiballon. Da die Volumina konstant bleiben sollen, muß bei Erhebung Gas entweichen, und in der Gleichung

Tragkraft = Auftrieb — Gasgewicht

ändern beide Glieder der rechten Seite und dadurch auch die linke Seite ihre Werte. Die Tragkraft eines konstanten Gasvolumens ist in außerordentlichem Grade von der Höhe (Barometerstand) abhängig, und auch die Temperaturen machen sich nach andern Gesetzen geltend.

Wir haben darnach die Ballone in zwei Klassen einzuteilen, die sich in fahrtechnischer Beziehung vollständig verschieden verhalten. Wir haben zu unterscheiden

A) Ballone, enthaltend ein unveränderliches Gasvolumen,

B) Ballone, enthaltend ein unveränderliches Gasgewicht.

Es ist mir nicht möglich gewesen, knappe Eigenschaftswörter zu finden, um die beiden Ballonarten dem Wesen der Sache nach zu kennzeichnen. Bis vor kurzem konnte man noch sinngemäß unterscheiden zwischen „prallen“ und „schlaffen“ Ballonen. Diese Bezeichnungen sind nicht mehr treffend, seit in den unstarren und halbstarren Lenkballonen das Ballonet (darüber § 20) zu so großer Bedeutung gekommen ist. In einem solchen Ballon, dessen Gasmasse durch die Ballonette unter einem Überdrucke von etwa 30 mm Wasser gehalten wird, ist die Hülle stärker gespannt, ist sie praller als in den größten bis jetzt gebauten Freiballonen. Trotzdem sind diese Ballone in fahrtechnischer Beziehung, so lange sie kein Gas abgeben, keine prallen, sondern schlaffe Ballone, denn sie fahren nicht mit konstantem Gasvolumen, sondern mit konstantem Gasgewichte.

Von größerer Wichtigkeit sind die Ballone der Klasse B, denn jeder sinkende, zur Landung übergehende Ballon, sowie jeder Ballon, der unter der einmal erreichten Maximalhöhe fährt, gehört dieser Klasse an. Von größerem Interesse ist die Theorie der Klasse A. Denn würde man nicht mit einer Änderung der Temperaturdifferenz zwischen Gas und Atmosphäre zu rechnen haben, so wäre durch den Lehrsatz S. 23 die Theorie der Klasse B erledigt.

Beispiel 18. Das Zeppelinsche Fahrzeug sei vor der Abfahrt

genau abgewogen; jeder seiner Ballone sei zu 97% angefüllt, so daß das Gas erst nach Ausdehnung um 3% durch die Füllansätze zu entweichen beginnt. Dann kann ein Minimum von Steigkraft das Fahrzeug die ersten 3 · 80 = 240 m hindurch heben; so lange ist es Fahrzeug der Klasse B, wie der Parsevalballon, so lange dessen Ballonette Gasabgabe verhindern. Beim Höhersteigen verwandelt er sich in ein Fahrzeug der Klasse A, während der Parseval immer der Klasse B angehören kann, und ein Höherkommen ist nur durch fortwährend hinzugegebene Steigkraft (Drachenwirkung, Benzinverbrauch, eventuelle Ballastabgabe) möglich. Hat das Fahrzeug in kontinuierlichem Aufstiege eine Höhe, nehmen wir an 1040 m, erreicht (ohne Wirkung der Tragflächen müßte sich dazu das Fahrzeug an Ballast und Benzin um etwa rund 1600 kg erleichtern) und beginnt dann zu sinken, so geht es wieder zu Klasse B über. Liegen nun die Temperaturverhältnisse günstig, so kann mittelst äußerst geringer Steig- und Sinkkraft das Fahrzeug in dem ganzen Intervall bis zu 1040 m beliebig auf- und abgeführt werden; es verhält sich wieder wie der Parsevalballon ohne Gasabgabe, und wie bei diesem kann sich nun der Benzinverbrauch unliebsam geltend machen; es tritt ein, was wir später als „überwerfen" (d. h. von Ballast) eingehend erörtern werden. Passiert das Fahrzeug die früher erreichte 1040 m Höhe, so geht es wieder zur Klasse A über. Stets, wenn es unter einer früher einmal erreichten Maximalhöhe fährt, ist es Klasse B; Klasse A, sowie es diese überschreitet. Unterhalb und oberhalb der früher erreichten Maximalhöhe hat die Vertikalsteuerung gänzlich verschiedene Gesetze zu befolgen. Seine maximale Steighöhe ist lediglich durch die verfügbare Steigkraft bedingt, die des Parsevalballones durch das Fassungsvermögen der Ballonette.

B. Die beiden Klassen Ballone unterscheiden sich auch in bezug auf die Art des Gleichgewichts, in dem sie schweben. Ein Ballon konstanten Gasgewichtes (Klasse B) an einer beliebigen Stelle der Atmosphäre im Gleichgewicht schwebend, wird, wenn wir ihn durch Hub und Schub ein kleines Stück in vertikaler Richtung auf- und abschieben, wobei von kleinen, die Verschiebung begleitenden Temperaturveränderungen oder sekundären Wirkungen abgesehen werden kann, auch an der neuen Stelle wieder im Gleichgewichte schweben. Ein solcher Ballon befindet sich deshalb in einem Gleichgewicht, das man in der Mechanik als „indifferent" bezeichnet. Die geringste Kraft und Arbeit reichen hin, den Ballon in vertikaler Richtung eine beliebige Strecke zu verschieben. Das hat den weitverbreiteten Irrtum veranlaßt, der Ballon der Klasse B (der „schlaffe" Ballon) befinde sich im labilen Gleichgewicht. Das ist unrichtig. Der

Ballon verhält sich wie eine Kugel auf glatter, horizontaler Unterlage; ihr Gleichgewicht ist indifferent. Wir können sein Verhalten kurz so charakterisieren, daß wir sagen, er besitzt nach keiner Richtung, weder nach oben noch nach unten „*Stabilität*".

Bei einem im Gleichgewicht schwebenden, prallen Ballone mit offenem Füllansatz haben wir zu unterscheiden zwischen Verschiebungen nach unten und nach oben. Im ersten Falle verhält sich der Ballon wie ein Ballon konstanten Gasgewichtes, gegenüber Verschiebungen nach abwärts ist sein Gleichgewicht indifferent. Bei Verschiebungen nach oben aber bleibt das Gasvolumen konstant (Klasse A), der Ballon verliert Gas, und wird der damit verbundene Verlust an Tragkraft nicht durch Ballast (oder Temperaturänderungen) kompensiert, so geht, losgelassen, der Ballon wieder herunter. Mit dieser Umkehr aber geht er zur Klasse B über; seine erhaltene Sinkkraft bleibt konstant, und er fällt bis zum Erdboden herunter (falls er nicht in neue Temperaturverhältnisse eintritt). Gegenüber Verschiebungen nach oben ist das Gleichtgewicht des Ballons konstanten Volumens labil. Jeder hebende Windstoß hat nachträglich, falls nicht durch Ballast oder Temperaturänderungen pariert wird, Landung zur Folge. Jede Ballastabgabe führt theoretisch zur Landung. Sie gibt dem Ballon eine geringe lebendige Kraft, durch die er, wie wir sehen werden, um eine Strecke etwa gleich seinem Durchmesser über die neue Gleichgewichtslage emporgeht. Wird dies Überschreiten der Gleichgewichtslage nicht durch Temperaturänderungen kompensiert, so ist Niedergang zur Landung zur Folge. Beinahe jedes Fahrdiagramm zeigt, wie sehr oft die Wirkung der Ballastausgabe nach Erreichung der neuen Gleichgewichtshöhe sofort umschlägt. Der Führer soll deshalb stets das Ende der Wirkung einer Ballastabgabe aufmerksam verfolgen, um nötigenfalls durch einige Hände voll Ballast einen etwaigen Niedergang aufzuhalten und die neue Gleichgewichtslage beizubehalten. Die Stabilität dieses Ballones nach abwärts ist Null, nach oben hat sie einen endlichen Wert; denn um ihn 1 m zu heben, muß eine Kraft angewandt werden, die sich zu $\frac{1}{8000}$ seiner Tragkraft ergeben wird.

Eine dritte Klasse Ballone, die sich durch konstantes Gasgewicht und konstantes Volumen auszeichnen, werden wir bei Behandlung des Ballonettes antreffen. Das Höheninterval, in dem sich diese Ballone bewegen können, ohne diese ihre sie auszeichnende Eigenschaft zu verlieren, ist nur gering. Werden sie aber nur innerhalb desselben vertikal nach oben oder unten verschoben, so kehren sie, losgelassen, wie eine leichte Überlegung zeigt, stets wieder in ihre Ausgangslage zurück; ihr Gleichgewicht

ist nach beiden Seiten hin stabil, ihre Stabilitä hat nach beiden Seiten von Null verschiedene Werte.

§ 8. Die Normalhöhe.

Die Hauptaufgabe, die sich bei der theoretischen Behandlung des Ballones einstellt, ist diese: gegeben sei auf geeignete Art und Weise die Gasmenge und Gasart, ihre Temperatur, die Temperatur der das Fahrzeug umgebenden Luft sowie die Belastung. In welcher Höhe über dem Lotpunkt, dessen Barometerstand bekannt ist, befindet sich das Fahrzeug im Gleichgewicht? Diese scheinbar selbstverständliche Aufgabe läßt aber, selbst wenn die eben erwähnten Daten in sich stimmend gewesen sind, keine exakte Lösung zu. Eindeutig bestimmt ist lediglich der zur Gleichgewichtslage gehörige Barometerstand; um diesen aber noch in Höhe umzurechnen, muß die mittlere Temperatur der zwischen Lotpunkt und Ballon vorhandenen Luftsäule gegeben sein. Herrscht z. B. am Lotpunkt ein Barometerstand von 720 mm und ist für die Gleichgewichtslage ein Barometerstand von 436 mm gefunden, so ist die Höhendifferenz 3850, 4000 oder 4090 m, je nachdem wir die mittlere Temperatur der Luftsäule zu -10^0, 0^0 oder $+6^0$ annehmen. Jede Änderung dieser Mitteltemperatur ändert für $\pm 1^0$ die Höhe für 1000 m um ± 4 m (s. oben § 2). Diese Mitteltemperatur, mit der Wetterlage und Jahreszeit außerordentlich veränderlich, ist aber vor der Fahrt unbekannt, so daß schon durch Unkenntnis derselben sich exakte Steighöhen nicht vorausrechnen lassen.[1]) Dieser Übelstand wird noch gesteigert dadurch, daß unsere Kenntnisse der in Wirklichkeit vorhandenen Gastemperaturen gänzlich unzulänglich sind. Es wird sich zeigen, daß wechselnde Gastemperaturen die Gleichgewichtshöhe des Leuchtgasballones um viele Hunderte von Metern ändern können. Es ließe sich nun ein Formelschema aufstellen, in welches die zur Berechnung der Gleichgewichtslage nötigen Daten nur eingesetzt zu werden brauchen, um diese mit aller Exaktheit zu erhalten. Allein aus den angeführten Gründen hätte dies umständliche und wenig durchsichtige Verfahren lediglich akademischen Wert. Wir schlagen ein anderes, für die Zweke der Praxis überaus

[1]) Bei Stellung von Übungsaufgaben ist zu achten, daß mittlere Temperatur und Temperatur der Gleichgewichtslage zusammenpassen. Namentlich, wenn statt der mittleren Temperatur das Temperaturgefälle der Atmosphäre gegeben wird, muß die Aufgabe erst rückwärts erledigt, d. h. Gasmenge oder Last berechnet werden, um die Lufttemperatur der Gleichgewichtslage gleich der durch das Temperaturgefälle bestimmten Temperatur zu erhalten.

genaues Verfahren ein. Wir führen dazu ein die „**Normalhöhe**".

Definition der Normalhöhe. Die Normalhöhe ist diejenige Höhe, die ein Ballon erreicht, falls die Temperatur von Gas und umgebender Luft, sowie die mittlere Temperatur der unter dem Ballon befindlichen Atmosphäre gleich 0^0 sind.

Ist diese überaus einfach berechenbare Höhe bekannt, so läßt sie sich leicht verbessern dadurch, a) daß wir die wahrscheinlich vorhandene mittlere Temperatur der Atmosphäre berücksichtigen, b) daß wir Temperatur der umgebenden Luft möglichst richtig ansetzen, wobei wir auch dem Gase diese Temperatur geben, und schließlich c) daß wir nunmehr dem Gase seine (vermutliche) Temperaturdifferenz gegen die Umgebung geben.

Die so errechnete Steighöhe ist für alle Zwecke der Praxis hinreichend genau; namentlich ergibt sich aber der große Vorteil, daß wir klar beurteilen können, in welcher Weise sich die zu berücksichtigenden Temperaturen bei den verschiedenen Gasarten und Ballonklassen geltend machen. Auch gibt bereits die Kenntnis der Normalhöhe, namentlich über den Einfluß der Gasart und das Gesetz der Ballastwirkung, die wichtigsten Aufschlüsse. Wie die mittlere Temperatur der Atmosphäre, die zur Umrechnung der Normalhöhe in die wirklich vorhandene Steighöhe bekannt sein muß, nach Jahreszeit und Wetterlage abgeschätzt werden kann, ist Sache der meteorologischen Schulung des Führers.

§ 9. Die Normalhöhe eines Ballones konstanten Gasvolumens.

Da bei dieser Klasse das Volumen des Gases konstant bleibt, werden wir naturgemäß ausgehen von der Tragkraft eines Kubikmeters. Da stets die Gleichung 11 gilt:

$$\text{Tragkraft} = \text{Auftrieb} - \text{Gasgewicht},$$

so ergibt sich, wenn wir den Umständen gemäß die Dichte (s. § 1) der tragenden Luft mit ρ, die des Gases mit ρ' bezeichnen:

$$\text{Tragkraft } T \text{ eines Kubikmeters} = \rho - \rho' \text{ Kilogramm.}$$

Gas und umgebende Luft stehen bei diesen Ballones selbstverständlich unter gleichem Drucke; sind noch die Temperaturen gleich, aber sonst beliebig $= t^0$, so können wir diese Gleichung durch Einführung des spezifischen Gewichts $s = \frac{\rho'}{\rho}$ (s. § 1) auch schreiben:

12) Tragkraft T_t eines Kubikmeters $= \rho(1 - s)$ Kilogramm.

Die *Normaltragkraft* T_0 ist dadurch definiert, daß die der Luft und dem Gase gemeinsamen Drucke und Temperaturen 760 mm und 0^0 sind; dann ist $\rho = \rho_0 = 1{,}293$ kg und wir haben

13) Normaltragkraft T_0 eines Kubikmeters $= \rho_0(1 - s) = 1{,}293(1 - s)$ Kilogramm.

Für reines Wasserstoffgas, $s = 0{,}069$, und Leuchtgas, $s = 0{,}456$, ergeben sich Normaltragkräfte von 1,2, resp. 0,7 kg; mit diesen Werten sind die nachfolgenden Beispiele durchgerechnet. (Für andere Gase s. Tabelle der Gaskonstanten.)

Faßt ein Ballon V Kubikmeter, und sehen wir ab von der äußerst geringen Änderung von Dichte und Druck von Gas und Luft längs seines vertikalen Durchmessers, so erhalten wir seine Normaltragkraft zu VT_0 Kilogramm. Bei 760 mm und 0^0 Temperatur haben wir somit V Kubikmeter Gas mit $G = VT_0$ Kilogramm Belastung im Gleichgewicht. Gehen wir zu größeren Höhen, also kleinen Drucken über, so haben wir in Gleichung 12 das der neuen Höhe (dem neuen Drucke) entsprechende ρ einzusetzen. Daraus ergibt sich (vgl. § 2) der Satz: *Die Normaltragkraft eines Ballones konstanten Volumens nimmt um $1^0/_0$ ihres Wertes ab, so oft der Ballon 80 m steigt*, welchen Satz wir bei Besprechung der Ballastwirkung weiter verfolgen werden. Jede Höhe ist bei einer Mitteltemperatur von 0^0 der durchschrittenen Luftsäule ausgezeichnet durch eine Höhenzahl n (Tabelle der Höhenzahlen). Wir finden (s. § 3) die zu dieser Höhe gehörige Luftdichte bei 0^0, indem wir $\rho_0 = 1{,}293$ durch n dividieren. Also ergibt sich in dieser Höhe und Temperatur die Tragkraft des Kubikmeters zu $\frac{T_0}{n}$ Kilogramm, und für die Last G, welche das unveränderliche Gasvolumen V Kubikmeter in der durch n ausgezeichneten Höhe tragen kann, ergibt sich die Gleichgewichtsbedingung

14) $$G = \frac{V \cdot T_0}{n} \text{ Kilogramm.}$$

Sind von den vier Größen Belastung (G), Volumen (V), Gasart (T_0) *und Normalhöhe (n) drei gegeben, so kann die vierte aus dieser Gleichung berechnet werden.* Die äußerst geringe Rechenarbeit kann mit Hilfe eines kleinen Rechenschiebers mit einer für die Praxis längst hinreichenden Genauigkeit erledigt werden.

Selbst diese kleine Rechenarbeit kann noch umgangen werden durch Benutzung der beigelegten

Tafeln I und II.

Beschreibung der Tafeln. Auf diesen ist der Inhalt der Gleichung 14) graphisch zur Darstellung gebracht. Da die Temperaturen sich bei Wasserstoffgas- und Leuchtgasfüllung gänzlich verschieden geltend machen, ist für jede Gasart ein eigenes Blatt gezeichnet; Aufgaben, welche die Temperatur nicht berücksichtigen, lassen sich für beide Gase auf jedem der beiden Blätter erledigen. Auf jedem Blatte sind unten auf einer horizontalen Achse die Belastungen G in Kilogramm aufgetragen; das Intervall reicht von 450 bis 1770 kg. Auf den vertikalen Achsen, zur Linken und zur Rechten eines jeden Blattes, sind die Gasvolumina aufgetragen; das Blatt für Wasserstoff hat die Volumenskala für Wasserstoff links, für Leuchtgas rechts, das Blatt für Leuchtgas umgekehrt. Jedes Blatt ist durchzogen von einer Schar gerader, *paralleler,* unter 45^0 geneigter Linien. Jede dieser Linien repräsentiert eine Höhe, deren Wert rechts oben angeschrieben ist. Die Tausender-Höhen sind stärker ausgezogen. Zwischen 0 und 1000 m schließen *zwei* Linien ein Höhenintervall von je 100 m, in Höhe über 1000 m von je 200 m ein. Dabei sind die Linien gleicher Höhendifferenz nicht unter sich parallel, sondern *äquidistant.* Auf den horizontalen und vertikalen Achsen sind die Gewichte und Volumina nicht direkt, sondern deren Logarithmen aufgetragen; dies hat den Vorteil, daß die Tafel nur *gerade* Linien enthält und alle etwa notwendigen Zwischenlinien mit dem Lineal oder längs einem geradkantigen Papierstreifen abgetragen werden können. Dadurch werden gleiche Intervalle von Gewicht und Volumen bei größeren Werten derselben durch immer kürzere Strecken dargestellt; allein dieselbe Strecke, etwa 1 cm, entspricht, längs einer Skala verschoben, immer demselben Bruchteil des anliegenden Skalenwertes. Die Volumenskalen, für Wasserstoff und Leuchtgas mit den Normaltragkräften 1,2 resp. 0,7 kg gezeichnet, sind sich gleich, nur um ein bestimmtes Intervall gegeneinander verschoben. Es ist dadurch möglich, die Tafeln auch für andere Normalauftriebe, für Gase anderen spezifischen Gewichtes oder für mit Wasserstoffgas vermischtes Leuchtgas zu gebrauchen. Wir suchen dazu das Volumen V des Wasserstoff- oder Leuchtgasballones, der mit dem 1000 cbm-Ballon der neuen Gasart von der Normaltragkraft T_0' gleichwertig ist, aus der Beziehung $V \cdot 1{,}2 = 1000\, T_0'$ resp. $V \cdot 0{,}7 = 1000\, T'$ und markieren die V auf der betreffenden Volumskala. Auf einem Papierstreifen wird die Volumskala abgepaust und der Streifen so verschoben, daß das Volumen 1000 auf die der neuen Tragkraft entsprechende Marke zu liegen kommt. — Für jeden Punkt der Tafelebene sind für eine bestimmte Gasart drei zusammengehörige Werte

von Ballonvolumen, Last und Höhe bestimmt und dadurch Gleichung 14 gelöst. Die horizontalen Linien zu beiden Seiten der Gewichtsskala und die sie durchsetzenden schiefen Linien lassen den Einfluß der Temperaturen entnehmen und werden später erläutert werden.

Beispiel 19. Der Ballon Phönix, Volumen 1200 cbm, Gewicht 350 kg, trägt 2 Passagiere von zusammen 150 kg, 12 kg Karten, Apparate usw. und schließlich noch 3 Sack Ballast à 12 kg. Welche Normalhöhe kann er so erreichen? — Am höchsten Punkte der Bahn ist er prall und das Gas mit 350 + 150 + 12 + 36 = 548 kg belastet. Wir suchen auf einer der beiden Tafeln (welche ist gleichgültig) den zum Leuchtgasvolumen 1200 und Gewicht 548 gehörigen Punkt (indem wir die bei diesen Skalenteilen errichteten horizontalen und vertikalen Linien zum Schnitt bringen) und sehen, daß durch diesen Punkt die Höhenlinie 3420 hindurchgeht. Dies ist die Normalhöhe.

Oder analytische Lösung mit Hilfe der Gleichung 14. Aus der Gleichung $\frac{1200 \cdot 0{,}7}{n} = 548$ ergibt sich $n = 1{,}533$, und aus der Tabelle der Höhenzahlen die zugehörige Normalhöhe 3420 m.

Beispiel 20. Zum Zwecke wissenschaftlicher Forschung soll ein Wasserstoffgasballon gebaut werden, der eine Gesamtbelastung von 400 kg auf eine Normalhöhe von 5000 m emporträgt. Wie groß muß dessen Volumen sein? — Wir errichten auf einem der beiden Blätter bei 400 kg die Senkrechte, suchen den Schnittpunkt mit der Höhenlinie 5000; die durch diesen Punkt gelegte Horizontale zeigt auf der Wasserstoffskala das gesuchte Volumen 625 cbm an.

Analytische Lösung. Gleichung 14 gibt, da zu 5000 m die Höhenzahl 1,87 gehört,

$$\frac{V \cdot 1{,}2}{1{,}87} = 400 \text{ und daraus } V = 625 \text{ cbm.}$$

Beispiel 21. Der Ballon Pettenkofer, $V = 1440$ cbm, Gewicht 410 kg, soll mit Leuchtgas ($T_0 = 0{,}7$ kg) zu Messungen des Staubgehaltes der Atmosphäre aufsteigen und eine Normalhöhe von 3500 m erreichen. Welche Nutzlast kann ihm im Maximum mitgegeben werden? — Die durch das Leuchtgasvolumen 1440 gelegte Horizontale schneidet die Höhenlinie 3500 m (die wir leicht einzeichnen können) in einem Punkte, dem das Gewicht 650 kg zugeordnet ist. Die Gondel kann also in dieser Höhe durch Passagiere, Instrumente und Ballast noch mit 650 — 410 = 240 kg belastet sein.

Gleichung 14 gibt $\frac{1440 \cdot 0{,}7}{1{,}55} = 650$ kg.

Beispiel 22. Aus einer belagerten Festung soll der Ballon *O*, $V = 637$ cbm, Gewicht zur Freifahrt ausgerüstet 232 kg, mit einem Führer (75 kg), 36 kg Ballast und 60 kg an photographischen Apparaten, Brieftauben und Depeschen ausfahren und des feindlichen Feuers wegen eine Normalhöhe von 1500 m erreichen.

a) Ist dies mit Füllung von Leuchtgas, $T_0 = 0{,}7$ kg möglich? Wir finden mit Hilfe der Tafel, daß zum Gewicht $232 + 75 + 36 + 60 = 403$ kg und einer Normalhöhe von 1500 m ein Leuchtgasvolumen von 695 cbm gehört. Der Ballon ist also um 58 cbm zu klein. Um mit ihm auszukommen, müßte die Normaltragkraft des Gases im Verhältnis 695 : 637 mal größer sein; dies gibt $T_0 = \frac{695}{637} \cdot 0{,}7 = 0{,}76$ kg. Analytisch. Wir finden mit Hilfe Gleichung 14, daß $\frac{637 \cdot T_0}{1{,}206} = 403$ $T_0 = 0{,}762$ ergibt.

b) Mit dem vorhandenen Wasserstoffgas muß sparsam verfahren werden. Es soll deshalb genau ermittelt werden, wieviel Kubikmeter Wasserstoffgas der Füllung beigemischt werden müssen, damit der Ballon das Verlangte leistet. — Die Gasmischung, die hergestellt werden soll, muß ein T_0 von 0,76 kg haben. Um die Mengen der Einzelbestandteile festzustellen, muß nach der bekannten Mischungsregel verfahren werden. Haben zwei Gase die Normalauftriebe T_1 und T_2, und soll eine Mischung vom Normalauftrieb T hergestellt werden, so berechnen sich die Anteile m_1 und m_2 der beiden Gase in einem Kubikmeter des Gemisches zu

$$m_1 = \frac{T - T_2}{T_1 - T_2}$$

$$m_2 = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_2}.$$

In unserm Falle ist $T_1 = 1{,}2$; $T_2 = 0{,}7$; $T = 0{,}76$. Daraus folgt $m_1 = 0{,}12$, $m_2 = 0{,}88$. In diesem Verhältnis ist zu mischen. Zur Füllung sind also $0{,}12 \cdot 637 = 76$ cbm Wasserstoff und $0{,}88 \cdot 637 = 561$ cbm Leuchtgas nötig. Bei Gasmangel, und um bei feindlichem Feuer rasch hoch zu kommen, wird man den Ballon schlaff gefüllt abgehen lassen. Mit welchen Gasmengen dann auszukommen ist, werden wir weiterhin kennen lernen.

Beispiel 23. Wie ändert sich die Normalhöhe eines Ballons bei gleicher Belastung mit der Art der Füllung? In Beispiel 19 fanden wir die Normalhöhe des mit Leuchtgas gefüllten, 548 kg schweren Phönix zu 3420 m. Für Füllung mit reinem Wasserstoff würden wir auf gleiche Weise 7720 m bestimmt haben.

Die Höhendifferenz ergibt sich zu 4300 m. Konstruieren wir auf eine der Tafeln und gehen auf den beiden zu gleichen Wasserstoff- und Leuchtgasvolumen gehörigen Horizontalen zu anderen, aber gleichen Gewichten über, so bleibt die Differenz 4300 m konstant; denn aus den parallelen, äquidistanten Höhenlinien werden immer zwei Linien gleicher Höhendifferenz ausgesondert. Dasselbe ist der Fall, wenn wir bei gleichem Gewichte zu anderem Ballonvolumen übergehen, denn die Wasserstoff- und Leuchtgasskala sind gleich, nur gegeneinander verschoben. Derselbe Ballon bei gleicher Belastung steht also mit Wasserstoffgasfüllung stets 4300 m höher wie bei Leuchtgasfüllung. Eine solch konstante, nur dem Zahlenwert verschiedene Höhendifferenz ergibt sich, auch wenn wir zwei andere Gasarten anwenden, da wir nur diesen entsprechend eine andere Tafel zu zeichnen hätten.

Analytische Lösung. Setzen wir Gleichung 14 für zwei Gasarten mit den Normalkräften T_1 und T_2 an, so erhalten wir

$$\frac{VT_1}{n_1} = G = \frac{VT_2}{n_2}$$

und für die durch die beiden Höhenzahlen n_1 und n_2 bedingte Höhendifferenz eine Höhenzahl

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

in dem Falle Wasserstoff-Leuchtgas $n = \frac{1,2}{0,7} = 1,714$; dazu gehört die Höhendifferenz 4300 m.

Wir haben also den Satz: *Gleiche, stets gleich belastete Ballone mit verschiedener Füllung beschreiben Wege, deren Vertikalprojektionen, von Temperatureinflüssen abgesehen, parallele Bahnen sind, deren Differenz nicht durch Größe und Gewicht des Fahrzeuges, sondern nur durch die Art der Füllung bestimmt ist.*

Diese Höhendifferenz beträgt:

4300 m für Wasserstoffgas $T_0 = 1,2$ und Leuchtgas $T_0 = 0,7$.
410 m für Wasserstoffgas $T_0 = 1,2$ und Wasserstoffgas $T_0 = 1,14$.
762 m für Leuchtgas $T_0 = 0,77$ und Leuchtgas $T_0 = 0,7$.
720 m für Leuchtgas $T_0 = 0,7$ und Leuchtgas $T_0 = 0,64$.

Beispiel 24. Wie verhalten sich ungleich große Ballone bei gleicher Füllung und gleicher Belastung? — Ziehen wir auf einer Tafel die zu zwei beliebigen Volumen gleichen Gases gehörigen Horizontalen, so bestimmen sie bei gleichem, aber beliebigem Gewichte in der Schar der parallelen, äquidistanten Höhenlinien stets zwei Linien gleicher Höhendifferenz, unabhängig davon, ob wir die Wasserstoff- oder Leuchtgasskala benützen.

Daraus folgt der Satz: *Ungleich große Ballone, aber von gleicher Füllung und gleicher Belastung, beschreiben Wege, deren Vertikalprojektionen, von Temperatureinflüssen abgesehen, parallele Bahnen sind, deren Differenz nur durch das Verhältnis der Volumina, unabhängig von Gewicht und Füllung, bedingt ist.*

Analytische Lösung. Gleichung 14 gibt für die beiden Volumina V_1 und V_2 die Bedingungsgleichung

$$\frac{V_1 T_0}{n_1} = G = \frac{V_2 T_0}{n_2},$$

und wir erhalten für die durch die beiden Höhenzahlen n_1 und n_2 bedingte Höhendifferenz eine Höhenzahl

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{V_1}{V_2}.$$

So steht z. B. bei gleicher, aber sonst beliebiger Belastung und gleicher Füllung der 1600 cbm-Ballon immer 840 m höher wie der 1440 cbm-Ballon, unabhängig, ob die beiden Ballone mit Leuchtgas oder Wasserstoffgas gefüllt sind (gleiche Temperaturverhältnisse vorausgesetzt).

Beispiel 25. Wertigkeit eines Ballones. Handikapierung. Die Wertigkeit eines Ballons kann gemessen werden durch das Gesamtgewicht, das er auf eine gegebene Höhe hinaufbefördern oder durch die Höhe, die er bei gegebenem Gesamtgewicht erreichen kann. Beides läuft auf dasselbe hinaus, da in der Gleichgewichtslage stets Gl. 14 erfüllt sein muß. Zwei Ballone sind gleichwertig, wenn für beide $\frac{V T_0}{n}$ oder $\frac{V T_0}{G}$ denselben Wert hat, oder auf einer Tafel durch beide derselbe Punkt der Zeichenebene bestimmt ist. Rechnerisch oder mit Hilfe der Tafel läßt sich aus einer Reihe Ballone leicht der zweckmäßigste auswählen; ebenso läßt sich leicht ermitteln, wie durch Mitgabe von unantastbarem Ballast diese auf gleiche Höhe abgestimmt (handikapiert) werden können. Z. B.: Zu einer Wettfahrt auf Höhe treten an Ballon O ($V = 637$ cbm, Gewicht ausgerüstet 232 kg), Georg (1080 cbm, 325 kg), Reiher (1180 cbm, 350 kg), Pettenkofer (1440 cbm, 410 kg) und Möwe 1550 cbm, 430 kg). Ballon O erhalte Wasserstoffgas ($T_0 = 1{,}2$), die übrigen Leuchtgasfüllung ($T_0 = 0{,}7$). Jeder Führer ist verpflichtet, 3 Sack Ballast à 12 kg zur Landung aufzubewahren; wird das Gewicht des Führers zu 75 kg angenommen, so trägt jeder Ballon in seiner Maximalhöhe noch 111 kg Nutzlast; die Belastungen sind hier also 343, 436, 461, 521 und 541 kg. Um den bei Wasserstoff und Leuchtgas sehr verschiedenen Einfluß der bei Sonnenstrahlung sich einstellenden, hohen Gastemperaturen auszuschalten, finde die Fahrt vor Sonnenaufgang oder nach Sonnenuntergang statt. Die Normal-

höhen geben dann ein hinreichendes Maß zur Beurteilung der wirklich erreichbaren Höhen.

a) Welchen Ballon wird sich ein kluger Führer auswählen? Mit Hilfe der Tafel finden wir die Normalhöhen 6380, 4400, 4660, 5275, 5340 m oder durch Gl. 14 die Höhenzahlen 2,22, 1,735, 1,792, 1,935, 2,005. Der kleinste Ballon ist infolge seiner Wasserstoffgasfüllung den anderen weit überlegen.

b) Welche Mengen unangreifbaren Ballastes hat jeder Ballon mitzubekommen, um die Aussichten auf Erfolg für alle Ballone gleich zu machen? Wir haben offenbar alle Ballone auf die kleinste dieser Höhen, 4400, oder mit Hilfe Gl. 14 auf die Höhenzahl 1,735 abzustimmen. Es ergeben sich die Belastungen 440, 436, 476, 581 und 626 kg und somit die Mengen plombierten Ballastes zu 97, 0, 15, 60 und 85 kg.

Wir werden später (Beispiel 37) dieselben Ballone die Wettfahrt in praller Sonne antreten lassen und werden finden, daß dadurch ihre Reihenfolge und die Zusatzballastmengen erheblich geändert werden.

Anmerkung. Wie verhält es sich mit der Normalhöhe eines Ballones konstanten Gasgewichtes? Diesem Ballon kommt keine Normalhöhe zu. Belasten wir die konstant bleibende Gasmenge gemäß ihrer konstant bleibenden Tragkraft (§ 7), so ist das Fahrzeug in jeder Höhenlage im Gleichgewicht; belasten wir stärker, so kann das Fahrzeug nicht steigen, belasten wir weniger, so verwandelt sich das Fahrzeug von einer gewissen Höhe (Prallhöhe) ab in ein Fahrzeug mit konstantem Gasvolumen, dessen Normalhöhe wir, wie oben auseinandergesetzt, finden, indem wir für das Volumen sein maximales Fassungsvermögen ansetzen.

§ 10. Das Gesetz der Ballastwirkung.

Das Gesetz der Ballastwirkung sagt aus, wie sich bei Ballastausgabe die *Normalhöhe* ändert. Ein Ballon konstanten Gasgewichtes besitzt, wie wir eben sahen, keine Normalhöhe, für ihn gibt es kein Ballastwirkungsgesetz. Die geringste Ballastausgabe verwandelt einen im Gleichgewichte schwebenden, schlaffen Ballon durch Überschreitung der Prallhöhe in einem Ballon konstanten Gasvolumens.

Ein Ballon konstanten Gasvolumens werde über seine Gleichgewichtslage emporgezogen; wir nennen ihn den Ballon B. Er kommt unter geringern Druck, und eine entsprechende Gasmenge tritt durch den Füllansatz aus. Wir lassen diese in eine leere, gewichtslose, leicht ausdehnbare Hülle, den Ballon b, übertreten. Nach dem Lehrsatze S. 23 besitzt eine dem Gewichte nach konstante Gasmenge überall dieselbe Tragkraft. Ballon B und

Ballon b zusammen haben deshalb überall dieselbe Tragkraft; was der Ballon B an Tragkraft verliert, gewinnt der Ballon b; an derselben beteiligen sich die beiden Ballone proportional ihren Volumen. So oft wir aber 80 m höher gehen, vergrößert sich (§ 2) der Ballon b um 1% des Volumens des Ballones B. So oft wir 80 m höher gehen, büßt deshalb durch Gasabgabe der Ballon B 1% seiner Tragkraft ein, unabhängig von dem absoluten Wert seines Volumens und der Art der Füllung.

Denselben Satz haben wir bereits auf S. 29 etwas anders abgeleitet. Erleichtern wir also irgend einen Ballon konstanten Volumens um 1% seiner Gesamtbelastung, so gewinnt er dadurch Steigkraft und geht empor in die neue Gleichgewichtslage, die er 80 m höher findet. Wir haben also den

Lehrsatz:

Jeder Ballon konstanten Gasvolumens erhöht seine Normalhöhe um 80 m, so oft wir seine Last um 1% verringern, unabhängig von seinem Volumen, seinem Gesamtgewicht, der Art seiner Füllung und der Höhe, in welcher diese Gewichtsverringerung erfolgt.

Diesen Satz hätten wir auch mit Hilfe unserer Tafeln ableiten können. Denn steigen wir auf, so gehen wir auf der durch das Ballonvolumen gelegten Horizontalen zu Linien größerer Höhe über. Da diese äquidistant sind, werden durch gleiche Höhendifferenzen auf der Gewichtsskala gleiche Längen ausgeschnitten. Da aber auf der Gewichtsskala die Logarithmen der Gewichte aufgetragen sind, so entsprechen gleichen Strecken gleiche prozentische Anteile des anliegenden Skalenwertes. (Siehe Beschreibung der Tafeln S. 30).

Nicht zu beträchtliche Änderungen der Normalhöhen können den Änderungen der in Wirklichkeit vorhandenen Steighöhen praktisch gleich gesetzt werden. Den Lehrsatz der Ballastwirkung können wir für die Zwecke der Praxis hinreichend genau auch für die Steighöhenänderung aussprechen, nötigenfalls, wie unten in den Beispielen erläutert, eine kleine Korrektion anbringen. Nur wenn die Temperaturverhältnisse stark oder sprungweise sich ändern, muß naturgemäß der Satz versagen. Wie dann zu verfahren ist, wird bei den Gesetzen des Temperatureinflusses erläutert.

Wir können das Gesetz leicht in eine Formel fassen. Ist die Belastung, die Tragkraft gleich G Kilogramm, so steigt der Ballon bei Erleichterung um 1%, d. s. $\frac{G}{100}$ kg, um 80 m. *Für jedes Kilogramm Gewichtserleichterung steigt der Ballon deshalb*

um $\frac{8000}{G}$ *m. Und beträgt die Gewichtsabgabe g Kilogramm, so ist die Zunahme der Steighöhe*

$$(15) \qquad \Delta h = 8000 \frac{g}{G} \text{ Meter.}$$

Obwohl diese Formel für die meisten Bedürfnisse der Praxis völlig ausreicht, können wir ihr leicht noch eine größere Genauigkeit geben. Denn teilen wir die Ballastabgabe g in zwei gleiche Teile g_1 und g_2, so wird g_2 eine größere Höhenzunahme bewirken wie g_1, da bei Ausgabe von g_2 das G der Formel 14 bereits um g_1 abgenommen hat. (Vgl. unten Beispiel 26). Wir erhalten deshalb eine außerordentliche vermehrte Genauigkeit, wenn wir G einen mittleren Wert geben, indem wir die Hälfte des auszugebenden Ballastes abziehen. So erhalten wir

$$(15a) \qquad \Delta h = 8000 \frac{g}{G - \frac{g}{2}} \text{ Meter.}$$

Nehmen wir $g = {}^1/_{10}\, G$, so gibt Formel 15 die Höhenzunahme um 40 m, Formel 15a nur um 3 m zu klein an. Für eine Ballastabgabe von 20% ($g = {}^1/_5\, G$) beträgt bei Formel 15a der Fehler nur 31 m.

Ist die Mitteltemperatur dieser Strecke von 0° verschieden, so wird pro Grad die Höhenänderung im gleichen Sinne um 4‰ ihres Wertes geändert.

Anmerkung. Das Gesetz der Ballastwirkung und Formel 15 resp. 15a können wir nur für Gewichts*verminderung*, $+ g$ = Gewichtsverminderung, anwenden. Jede Gewichtsvermehrung, etwa durch Tau, Regen oder Schnee, verwandelt den Ballon in einen Ballon konstanten Gasgewichtes, und die erhaltene Sinkkraft bringt ihn zur Landung, falls er nicht in andere, entgegenwirkende Temperaturverhältnisse eintritt.

Beispiel 26. Der Ballon Pettenkofer, $V = 1440$ cbm sei in München mit Leuchtgasfüllung zur Abfahrt abgewogen; die Belastung betrage 960 kg. Die Ballastsäcke sind 12 kg schwer. Dann läßt (warme oder kalte Bodenschichten seien nicht vorhanden) die Ausgabe des ersten Sackes Ballast den Ballon um $8000 \frac{12}{960} = 100$ m ansteigen. Sind 10 Sack ausgegeben, so ist die Belastung nur noch 840 kg, und der 11. ausgegebene Ballastsack vermehrt die Höhe um $8000 \frac{12}{940} = 113$ m, der 21. Sack um 133 m. Der Führer beachte, daß mit zunehmender Höhe die Wirkung gleicher Ballastabgabe zunimmt. Das hat zur Folge, daß wir durch Formel 15 für große g ein zu kleines Δh erhalten. Wir brauchen

aber bei Anwendung der Formel, wie schon oben bemerkt, nicht zu ängstlich zu sein. Erleichtern wir um 5 Sack, so gibt Formel 15 $\Delta h = 8000 \frac{60}{960} = 500$ m. Benützen wir aber unsere Tafeln, suchen die zu $V = 1440$ cbm Leuchtgas und 960 kg gehörige Höhe und gehen wir zu einem um 60 kg kleineren G nach links, so finden wir eine Höhenzunahme von 520 m. Der Fehler beträgt somit nur 20 m. Wir sehen so auch, wie den Tafeln die Wirkung beliebig großer Ballastabgabe entnommen werden kann.

Beispiel 27. Sollen bei Ballonen verschiedener Größen und Füllung die Ballastsäcke gleiche Wirkung erzielen, so dürfen diese selbstverständlich nicht gleich schwer sein. Z. B. Ballon O, $V = 637$, Ballon Reiher, $V = 1180$, Ballon Möwe, $V = 1550$ cbm, seien der erstere mit Wasserstoffgas, die anderen mit Leuchtgas gefüllt. Um in *gleicher Höhe* gleiche Höhenzunahme zu bewirken, müssen sich die Gewichte der Ballastsäcke offenbar verhalten wie $637 \cdot 1{,}2 : 1180 \cdot 0{,}7 : 1550 \cdot 0{,}7 = 764 : 826 : 1085$. Sind die Ballastsäcke des Reihers 12 kg schwer, so muß der Ballon O 11, die Möwe 16 kg schwere Ballastsäcke erhalten. Erhält derselbe Ballon an Stelle des Leuchtgases eine Wasserstoffgasfüllung, so sind die Ballastsäcke im Verhältnis von 0,7 : 1,2 weniger wirksam; einem 12 kg Sack entspräche ein 21 kg fassender Sack. Sind für verschiedene Ballone nur Säcke von einerlei Fassungsvermögen vorhanden, so beachte der Führer ihre verschiedene Wirkung.

Beispiel 28. Der Zeppelinsche Ballon, $V = 15000$ cbm, sei in Friedrichshafen, Seehöhe 400 m, $t = 15^0$, prall gefüllt zur Fahrt abgewogen; er sei insgesamt mit 16000 kg belastet. Er fahre in 200 m relativer Höhe nach München, der Bahnlinie Kempten-Buchloe folgend, die bei Günzach in 800 m Seehöhe ihre höchste Höhe erreicht. a) Wieviel Ballast hat das Fahrzeug auszugeben, falls auf dynamische Tragwirkung verzichtet wird? — Der Ballon hat sich um 600 m $= 7\frac{1}{2} \cdot 80$ m über seine Ausgangshöhe zu erheben; dazu müssen $7{,}5\%$ seiner Last, das sind 1200 kg abgegeben werden. b) War der Ballon nur zu 97% gefüllt, so kann er die ersten $3 . 80 = 240$ m ohne Ballastabgabe steigen; die nötige Ballastabgabe (inkl. Benzinverbrauch) beträgt dann noch $4\frac{1}{2}\% = 720$ kg; allein um die Differenz von 480 kg konnte das Fahrzeug dann zur Abfahrt weniger belastet sein. Ein Teil der Ballastabgabe kann durch dynamische Tragwirkung auf Kosten der Geschwindigkeit ersetzt werden. Nimmt das Fahrzeug, um die Steigung bei Günzach zu ersparen, den Weg über Ulm, so hat es, da München 520 m hoch liegt, nur 320 m Höhe zu überwinden, wozu $4\% = 640$ kg Steigkraft notwendig

sind. Für je 100 m Höhenzunahme vermindert sich die Tragkraft der Füllung um 200 kg.

Beispiel 29. Wir lesen in „Die Luftschiffahrt, von Graf Ferd. v. Zeppelin und anderen Fachmännern, S. 99“: „Das Zeppelinsche Luftschiff, Modell 1907, würde nach Ausgabe oder Verbrauch des gesamten Nutzballastes eine Höhe von 3600 m erreichen können. In einer Höhe von 1000 m würde es noch rund 900 kg Betriebsmaterial mitzuführen vermögen.“ Diese 3600 m müssen ein Irrtum oder ein Druckfehler sein. Denn da zu 3600 m eine Höhenzahl $n = 1{,}57$ gehört, vermag das Schiff in dieser Höhe nach Formel 14 eine Belastung $G = \frac{15000 \,.\, 1{,}2}{1{,}57} = 11460$ kg zu tragen. Da seine Tragkraft am Meeresniveau $15000 \cdot 1{,}2 = 18000$ kg beträgt, müßten zum Aufstieg auf 3600 m $18000 - 11460 = 6540$ kg Ballast abgegeben werden können, was offenbar nicht möglich ist. Rechnen wir die gesamte Erleichterung, die möglich ist, zu 3000 kg, so ergibt sich die maximale Steighöhe nach Formel 15a zu $8000 \cdot \frac{3000}{16500} = 1200$ m, die nur durch dynamischen Auftrieb (siehe unten § 21) um einige hundert Meter überschritten werden kann. Wahrscheinlich sind die 3600 m ein Druckfehler. Denn nehmen wir wie vorhin den verfügbaren Ballast zu 3000 kg und geben $3000 - 900 = 2100$ kg aus, so ergibt sich eine Steighöhe (Formel 15a) von

$$8000 \cdot \frac{2100}{18000 - 1050} = 990 \text{ m},$$

also Übereinstimmung mit dem Inhalt des zweiten angeführten Satzes.

Beispiel 30. Zwei Ballone gleichen Inhaltes von 1440 cbm sind, der eine mit Wasserstoff, der andere mit Leuchtgas gefüllt, während der Fahrt in Gleichgewichtslagen. Die beiden Führer geben je 20 kg Ballast aus, mit der Wirkung, daß beide Ballone durch gleiche Strecken hindurch steigen. Wie groß war die Höhendifferenz ihrer Gleichgewichtslagen? — Da gleiche Ballastausgaben gleiche Wirkungen erzielen, müssen beide Ballone gleich belastet sein. Zwei Ballone gleichen Inhaltes und gleicher Belastung und diesen beiden verschiedenen Füllungen haben nach Beispiel 23 stets eine Höhendifferenz von 4300 m.

§ 11. Die vier Gesetze des Temperatureinflusses.

Bei Berechnung der Tragkraft einer Gasfüllung gehen wir stets aus von der Annahme, daß Gas und umgebende Luft auf der Temperatur 0^0 sind. In Wirklichkeit werden Gas und Luft

anders temperiert sein; der Einfluß dieser geänderten Temperaturen läßt sich in vier überaus anschauliche Gesetze zusammenfassen. Die Anzahl von vier Gesetzen ist in der Natur der Sache begründet. Denn wir haben erstens Gas und Luft gemeinsam die Temperatur der letzteren zu geben und dann zweitens zwischen beiden die in Wirklichkeit vorhandene Temperaturdifferenz eintreten zu lassen. Die beiden so erzielten Wirkungen haben wir bei dem Ballon konstanten Gasvolumens und dem Ballon konstanten Gasgewichtes getrennt zu untersuchen. Eine fünfte Beeinflussung der Normalhöhe, die darin liegt, daß die Mitteltemperatur der bis zu dieser Höhe errichteten Luftsäule von 0^0 verschieden ist, hat mit der Technik der Ballonführung nichts zu tun. Ist diese Mitteltemperatur $\pm t^0$, so verfahren wir, wie schon S. 27 angedeutet, mit hinreichender Genauigkeit so, daß wir die Normalhöhe um $\pm t\, 4^0/_{00}$ ihres Wertes ändern, der tragenden Luftschicht, statt 0^0, die in dieser Höhe in Wirklichkeit vorhandene Temperatur geben und nun die Temperaturgesetze anwenden in ihrer Einwirkung auf die so den vorliegenden Verhältnissen entsprechend abgeänderte Normalhöhe.

Wir gehen aus von der Gleichung 11

Tragkraft = Auftrieb — Gasgewicht.

A) Gas und umgebende Luft sind auf gleicher, sich ändernder Temperatur.

a) Der Ballon konstanten Gasgewichtes. Dieser Fall ist bereits oben S. 23 erledigt. Wir haben den

Satz 1.

Die Tragkraft eines konstanten Gasgewichtes ist konstant, solange Gas und Luft auf beliebiger, aber gleicher Temperatur sind.

b) Der Ballon konstanten Gasvolumens. Bei Steigerung der Gas und Luft gemeinsamen Temperatur wird Gas entweichen. Das dem Ballon B (vgl. oben S. 36) entweichende Gas fangen wir auf in einer vollkommen ausdehnbaren Hülle b. Ballon B und b zusammen besitzen nach Satz 1 konstante Tragkraft; was Ballon B verliert, gewinnt Ballon b; umgekehrt wird bei sinkender Temperatur B auf Kosten von b gewinnen. Auf beide Ballone B und b verteilt sich die Tragkraft proportional ihren Volumen; für jeden Grad Temperaturänderung ändert b sein Volumen um $4^0/_{00}$ des Volumens von B. Wir haben somit den

Satz 2.

Ändert die für Gas und Luft gleiche Temperatur ihren Wert um $\pm t^0$, so ändert sich die Tragkraft einer Gasmasse in entgegengesetztem Sinne um $t \cdot 4^0/_{00}$ ihres Wertes.

B) Das Gas erhält eine Temperaturdifferenz $\pm \Delta t^0$ gegen die umgebende Luft.

a) Der Ballon konstanten Gasvolumens.

In Gleichung 11 bleibt, da die verdrängte Luft nach Dichte und Volumen konstant bleibt, der Auftrieb konstant; das Gasgewicht aber ändert sich. Für jeden Grad Temperaturänderung ändert sich (§ 1) die Luftdichte, also auch das Gewicht eines konstant bleibenden Gasvolumens in entgegengesetztem Sinne um $4^0/_{00}$ seines Wertes. Mit Berücksichtigung, daß in Gleichung 11 das Gasgewicht mit negativen Vorzeichen eingeht, haben wir den

Satz 3.

Ändert ein konstantes Gasvolumen seine Temperaturdifferenz gegen die umgebende Luft um $\pm \Delta t^0$, so ändert sich seine Tragkraft um $\pm \Delta t \cdot 4^0/_{00}$ ***des Gasgewichtes.***

b) Der Ballon konstanten Gasgewichtes.

In Gleichung 11 bleibt das Gasgewicht konstant. Für jeden Grad Temperatursteigerung des Gases wächst aber das Volumen der verdrängten Luftmasse um $4^0/_{00}$ ihres Wertes; und da Druck und Temperatur derselben sich nicht ändern, auch um denselben Betrag ihr Gewicht, der Auftrieb. Wir haben somit den

Satz 4.

Ändert ein konstantes Gasgewicht seine Temperaturdifferenz gegen die umgebende Luft um $\pm \Delta t^0$, so ändert sich seine Tragkraft um $\pm \Delta t \cdot 4^0/_{00}$ seines ***Auftriebes.***

Wir sehen, daß gemäß den Gesetzen 2, 3, 4 je eines der Glieder der Gleichung 11 seinen Wert ändert, nach Gesetz 1 sämtlich konstant bleiben. Der innere Mechanismus dieser Fundamentalgleichung tritt so am klarsten zutage.

In den folgenden Paragraphen haben wir die Bedeutung dieser Gesetze für die Technik der Ballonführung zu untersuchen.

§ 12. Einfluß der Gas und umgebenden Luft gemeinsamen Temperatur auf Tragkraft und Normalhöhe eines Ballones konstanten Volumens.

Nach Satz 2 des § 11 nimmt die Tragkraft um $4^0/_{00}$ ihres Wertes ab oder zu, so oft die Gas und Luft gemeinsame Temperatur um 1^0 zu- oder abnimmt. Ist bei der gemeinsamen Temperatur 0^0 die Tragkraft G Kilogramm, die neue gemeinsame Temperatur t^0, so beträgt die Zunahme ΔG der Tragkraft, falls wir für $4^0/_{00}$ wieder α (vgl. § 1) ansetzen:

16) $$\Delta G = -\alpha t G \text{ Kilogramm.}$$

Mit Hilfe des Ballastwirkungsgesetzes, Formel 15, können wir sofort die zugehörige Änderung Δh der Normalhöhe angeben, die durch ΔG bewirkt wird. Denn nach Formel 15 bewirkt eine Steigkraft von g Kilogramm eine Höhenänderung von $8000 \frac{g}{G}$ Meter. Ersetzen wir die Steigkraft g durch die Steigkraft ΔG gemäß 16, so erhalten wir eine Zunahme der Normalhöhe

17) $$\Delta h = -8000 \alpha t = -30 t \text{ Meter.}$$

($\alpha = 4\text{‰}$ würde $32 t$ Meter, der genaue Wert $\alpha = 0{,}003665$ hingegen $29{,}3 t$ Meter ergeben. Wir setzen deshalb mit großer Genauigkeit den leicht im Gedächtnis zu behaltenden Faktor $= 30$ und haben somit den Satz:

Die Normalhöhe des Ballones konstanten Volumens nimmt um 30 m zu oder ab, so oft die Luft und Gas gemeinsame Temperatur um 1^0 ab- oder zunimmt, unabhängig von Volumen, Höhe und ***Art der Füllung.***

Bei Anwendung dieses Gesetzes ist sorgfältig darauf zu achten, daß der Ballon immer von konstantem Volumen ist. In großer Höhe oder im Winter werden wir fast stets mit Temperatur unter Null Grad zu rechnen haben, wobei Gleichung 16 und 17 gelten; würde jedoch ein bei bedecktem Himmel steigender Ballon plötzlich in eine kältere Luftschicht eintreten, so würde er sich durch Zusammenziehen des Gases in einen Ballon konstanten Gasgewichtes verwandeln.

Die Änderung der Normalhöhe Δh wird man gemäß Formel 17 ohne eigentliche Rechenarbeit erledigen; diese sowohl, wie das ΔG der Formel 16 lassen sich aber ohne weiteres den Tafeln I und II entnehmen. Da die Natur der Füllung in diese Formel nicht eingeht, ist es gleichgültig, ob wir die Tafel für Wasserstoff oder Leuchtgas benützen. Unten an den Tafeln sind der Gewichtsskala parallel zu beiden Seiten Linien konstanter Temperatur in Intervallen von 10^0 gezogen. Diese sind durch *ausgezogene*, von links oben nach rechts unten geneigte, unter sich parallele Linien durchzogen; diese geben die *Richtung* an, in welcher von einer Temperaturlinie zur anderen übergegangen werden muß. Eine leichte Überlegung gibt sofort an, ob den Vorzeichen der Formeln 16 und 17 entsprechend diese Linien nach links oder nach rechts zu durchlaufen sind[1]). (Die Tafeln gestalten sich

1) Mit Berücksichtigung der Luft und Gas gemeinsamen Temperatur t^0 wird (Gleichung 14)

$$G = \frac{V \cdot T_0}{n}(1 - \alpha t)$$

so übersichtlicher und der Gebrauch einfacher, als wenn diesem Richtungssinne noch besonders Rechnung getragen wäre.) Diese Linienzüge werden folgendermaßen benützt. Angenommen für irgend einen Ballon würde sich in einer gewissen Normalhöhe die Tragkraft $G = 930$ kg ergeben, in dieser Höhe wäre aber die Luft und Gas gemeinsame Temperatur $+ 12^0$, so ziehen wir durch den Punkt $G = 930$ eine Linie parallel den schiefen, ausgezogenen Linien, bringen sie zum Schnitte mit der 12^0 entsprechenden Horizontale, lesen auf der Gewichtsskala wieder das zugehörige G ab und finden, ob wir nach links oder rechts konstruieren (bis auf einen nicht in Betracht kommenden kleinen Bruchteil gleich) $\Delta G = 40$ kg, da wir 890 resp. 970 kg ablesen. Da Temperatursteigerung Abnahme der Tragkraft bedeutet, wissen wir, daß wir nach *links* zu gehen haben. Wollen wir die Änderung der Normalhöhe haben, so müssen wir, da wir zu kleinerer Höhe kommen müssen, nach rechts konstruieren, ziehen also zwei Senkrechte durch $G = 930$ und 970 und bringen diese zum Schnitte mit irgend einer bequem gelegenen Horizontallinie konstanten Ballonvolumens und entnehmen, daß die neue Gleichgewichtslage 350 m tiefer liegt. Wollen wir nur die Differenz, so könnten wir ebensogut nach links konstruieren; ist aber die Normalhöhe gegeben, so finden wir die neue Höhe durch Konstruktion nach rechts.

Beispiel 31. Der Ballon Pettenkofer, $V = 1440$ cbm, sei in München, Meereshöhe 520 m, mit Leuchtgas $T_0 = 0{,}7$ gefüllt und bei bedecktem Himmel (in der Halle) abgewogen. Die Temperatur der Füllung werde deshalb gleich der Lufttemperatur, die zu 15^0 gemessen wurde, angenommen. Wie schwer ist das Gas belastet?

Wir gehen auf einer der Tafeln auf der Horizontalen durch $V = 1440$ cbm Leuchtgas zur Höhenlinie 520 und lesen auf der Gewichtsskala dazu gehörig $G = 945$ kg ab. (Dies wäre die Tragkraft bei der gemeinsamen Temperatur 0^0). Wir ziehen durch den Punkt $G = 945$ eine Parallele zu den ausgezogenen Temperaturrichtungslinien, gehen auf dieser, da die Tragkraft abgenommen hat, nach links hinauf bis zu der zu 15^0 gehörigen Horizontalen

---

Wir haben in der Tafel also wiederzugeben die Gleichung:

$$\log G = \log V + \log T_0 - \log n + \log (1 - \alpha t);$$

da α sehr klein, setzen wir mit längst hinreichender Genauigkeit $\log(1 - \alpha t) = - \alpha t$, dividieren durch den Modul 2,3 und konstruieren die Schar der ausgezogenen, parallelen Linien, die Tangente des Neigungswinkels $\frac{0{,}003665}{2{,}3} = 0{,}00159$ im Maßstabe der Zeichnung richtig wiedergebend.

und lesen vertikal unter dem Schnittpunkte das gesuchte $G = 895$ kg ab. Die erhöhte Lufttemperatur hat die Tragkraft um 50 kg, etwa 4 Sack Ballast à 12 kg herabgesetzt. Formel 16 würde $15 \cdot 4‰ = 6\%$ von 940, d. s. 56 kg (etwas zu hoch, da α etwas kleiner wie $4‰$, aber noch hinreichend genau) Differenz ergeben haben. Würde bei Fahrten im Sommer und Winter die Differenz der Lufttemperaturen 30^0 betragen, so ziehen wir, um den Einfluß zu finden, durch $G = 945$ kg hindurch eine Temperaturrichtungslinie; die Strecke derselben, die zwischen zwei horizontalen Temperaturlinien mit 30^0 Differenz verläuft, schneidet auf die G-Achse projiziert eine Strecke entsprechend 100 kg aus, entsprechend dem Unterschied der Tragkräfte. Der Führer beachte den außerordentlichen Einfluß der Lufttemperatur auf die Tragfähigkeit; schlechtes Tragen wird häufig fälschlicherweise schlechter Beschaffenheit des Leuchtgases, statt erhöhter Lufttemperatur zugeschrieben. Auf ein Fahrzeug von der Größe des Z II, $V = 15000$ cbm, bewirkt jeder Grad Lufttemperatur bei der Abfahrt eine Änderung der Tragfähigkeit von etwa 65 kg; 10^0 würden einer Änderung der Anzahl Passagiere um etwa acht Personen entsprechen.

Beispiel 32. Ein Ballon erreiche eine Normalhöhe von 3500 m. In dieser herrsche eine Lufttemperatur von -10^0; der Himmel sei bedeckt und das Gas infolgedessen auf derselben Temperatur angenommen. Um wieviel Meter liegt die in Wirklichkeit erreichte Höhe darüber? Wir greifen auf der Höhenlinie 3500 irgend einen Punkt heraus, gehen vertikal herunter auf die Gewichtslinie, verfolgen eine ausgezogene Temperaturrichtungslinie durch 10^0 hindurch nach links (denn wir müssen zu größeren Höhen kommen), gehen dann wieder senkrecht herauf zur selben Volumenlinie, von der wir ausgingen, und finden, daß durch den Schnittpunkt die Höhenlinie 3290 m hindurch geht. Die Höhenzunahme beträgt 290 m; nach dem abgekürzten Verfahren der Formel 17 hätten wir 300 m berechnet. Da 290 nahe gleich $3{,}5 \cdot 80$, hätte ein Ballon bei 0^0 Lufttemperatur $3\frac{1}{2}\%$ seiner Last opfern müssen, um bei 0^0 Lufttemperatur diesen Höhenüberschuß zu gewinnen.

Beispiel 33. Den Ballon O, $V = 637$ cbm, Wasserstoffüllung, fährt im Sommer bei ruhiger Wetterlage vor Sonnenaufgang auf und trifft in 300 m über München Temperaturumkehr. Er schwimmt in Luft von 3^0, darüber liege eine Luftschicht von 12^0. Wieviel Ballast hat der Führer auszugeben, um durchzustoßen? — An der Trennungsfläche der beiden Luftschichten schwebt der Ballon in 820 m Meereshöhe; wir gehen auf der Horizontale entsprechend 637 cbm Wasserstoff zur Höhenlinie 820 und treffen so auf der Gewichtsachse $G = 740$ kg.

Dies wäre die Belastung bei 0^0 Lufttemperatur. Auf einer Temperaturrichtungslinie gehen wir um 3^0 nach links, treffen $G = 730$ kg (das ist die wirkliche Belastung) und gehen nochmals $12 - 3 = 9^0$ weiter, wodurch wir auf $G = 705$ kg kommen. Der Führer hat also $730 - 705 = 25$ kg Ballast zu opfern, um durchzustoßen. Erfahrungsgemäß wird im Sommer, bei ruhiger Wetterlage, vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang in wenig hundert Meter Höhe Temperaturumkehr angetroffen; auch häufig im Winter, bei andauernder, klarer Frostperiode. An der wärmeren Luftschicht stößt der mit zu geringer Steigkraft versehene Ballon an, wie an einer unsichtbaren Decke. Der Führer sei dann auf die erforderliche Ballastausgabe vorbereitet. Umgekehrt, wie hier gezeigt, lassen sich aus gut geführten Bordbüchern, bei überlegter Führung, aus notwendig werdenden Ballastopfern wichtige Schlüsse ziehen auf die Temperaturschichtung der Atmosphäre.

§ 13. Einfluß der Gastemperatur auf Tragkraft und Höhe des Ballones konstanten Gasvolumens.

Zur Anwendung kommt das Temperaturgesetz 3 des § 11: Ändert ein konstantes Gasvolumen seine Temperatur gegen die umgebende Luft um $\pm \Delta t^0$, so ändert sich dessen Tragkraft um $\pm \Delta t \cdot 4\%_0$ seines *Gewichtes*.

Schwebt ein Ballon vom Volumen V, angefüllt mit Gas vom spezifischen Gewichte s in einer Luftschicht von der Dichte ρ, so wiegt das Gas $V\rho s$ Kilogramm. Ändert sich die Gastemperatur um $\pm \Delta t^0$ gegen die anfänglich gleich temperierte Luft, so beträgt nach Temperaturgesetz 3 die Änderung ΔG der Tragkraft

$$\Delta G = \pm V\rho s \cdot \alpha \Delta t \text{ Kilogramm.}$$

Bei anfänglich gleicher Temperatur ist die Tragkraft G (Formel 12)

$$G = V\rho (1 - s) \text{ Kilogramm,}$$

so daß wir, wenn wir in der vorigen Gleichung das Gasgewicht durch die Tragkraft ersetzen, erhalten

$$18) \qquad \Delta G = \pm \frac{s}{1 - s} \alpha \Delta t G \text{ Kilogramm.}$$

Da ein Gewinn ΔG an Steigkraft auch durch eine Ballastausgabe von $g = \Delta G$ Kilogramm erzielt werden kann, so erhalten wir die eintretende Zunahme Δh der Höhe, wenn wir in der Ballastformel 15) $\frac{g}{G}$ durch das $\frac{\Delta G}{G}$ der Formel 18 ersetzen, zu

19) $$\Delta h = \pm 8000 \cdot \frac{s}{1 - s} \alpha \Delta t \text{ Meter.}$$

Der Faktor $\frac{s}{1-s}$ ist (namentlich für kleine s) mit s außerordentlich veränderlich. Er ist für Wasserstoff ($s = 0{,}069$) $= 0{,}074$; für Leuchtgas ($s = 0{,}456$) $= 0{,}839$ (andere Werte siehe Tabelle der Gaskonstanten).

Multiplizieren wir mit $\alpha = 0{,}003\,665$, und noch mit 8000, so ergibt sich

18a) $\Delta G = \pm\ 0{,}000\,271\ \Delta t \cdot G$ Kilogramm für Wasserstoffgas
$\Delta G = \pm\ 0{,}00\,307\ \Delta t \cdot G$ Kilogramm für Leuchtgas

und

19a) $\Delta h = \pm\ 2{,}17\ \Delta t$ Meter für Wasserstoffgas
$\Delta h = \pm\ 24{,}6\ \Delta t$ Meter für Leuchtgas.

Wir sehen, daß der Wasserstoffballon sowohl in bezug auf Tragkraft als Höhen auf Änderungen der Gastemperatur 11 mal weniger empfindlich ist wie der Leuchtgasballon. Für Zwecke der Praxis hinreichend genau können wir die Änderungen der Tragkraft zu 0,3‰ resp. 3‰ der Tragkraft, die Änderungen der Höhe zu 2 resp. 25 m pro Grad Temperaturänderung ansetzen, für den Wasserstoffballon sogar meistens beide vernachlässigen.

Es ist ohne weiteres klar, daß mit zunehmendem spezifischen Gewicht des Füllgases dieser Temperatureinfluß zunehmen muß. Denn diese Zunahme der Tragkraft rührt daher, daß das Gasgewicht abnimmt (Tragkraft = Auftrieb — Gasgewicht); je schwerer das Gas, desto mehr vermindert sich dessen Gewicht pro Kubikmeter des durch Erwärmung ausgetriebenen Gases.

Die Änderung ΔG und Δh können wir nach den Formeln 18a und 19a berechnen oder nach der angegebenen, einfachen Regel durch Kopfrechnen überschlagen. Wir können auch unsere Tafeln benützen. Selbstverständlich ist jetzt die dem betreffenden Gase zugehörige Tafel zu wählen (für die Zwecke der Praxis genau genug, kann aber, wie schon bemerkt, ΔG und Δh beim Wasserstoftballon fast in allen Fällen gleich Null gesetzt werden). Die horizontalen Temperaturlinien sind durchsetzt von unter sich parallelen, *gestrichelt* gezeichneten Temperaturrichtungslinien, die von links oben nach rechts unten verlaufen. Wir legen durch die Stelle der Gewichtsskala, auf die wir geführt werden, eine solche Richtungslinie und durchlaufen sie durch das Temperaturintervall Δt hindurch; ob wir nach rechts oder links gehen sollen, oder ob der Richtungssinn gleichgültig ist, zeigt jeweils die einfachste Überlegung. Das in dem Temperaturintervall Δt eingeschlossene Stück der Richtungslinie projizieren

wir auf die Gewichtslinie und erhalten so das gesuchte ΔG. Um dies in Höhendifferenz umzusetzen, gehen wir von seinen Enden senkrecht nach oben bis zu einer beliebigen horizontalen Volumenlinie; durch die Schnittpunkte gehen 2 Höhenlinien von der gesuchten Differenz Δh.[1])

Bei Anwendung dieses Temperaturgesetzes ist sorgfältig zu überlegen, ob bei der sich ausbildenden Temperaturdifferenz Δt der Ballon von konstantem Volumen bleibt. Die Temperaturgegensätze zwischen Gas und Luft, die für die Ballonführung in erster Linie von Wichtigkeit sind, rühren her von Strahlungseinflüssen; Änderungen der Gastemperatur infolge von Zusammendrückung und Ausdehnung während des Ab- und Aufsteigens sollen an anderer Stelle (Theorie der Landung) besprochen werden. Zunahme der Sonnenstrahlung wird den prallen Ballon stets prall lassen; Abnahme derselben, etwa durch einen Cirrusschleier, der vor die Sonne tritt, oder einen Wolkenschatten, lassen Δt, und damit das Gasvolumen, abnehmen, verwandeln den Ballon, falls er nicht durch genügend Ballastauswurf in hinreichend höhere Lage geführt wird, in einen Ballon konstanten Gewichtes, und ΔG darf nicht mehr nach Gleichung 18 berechnet werden (wie, s. unten § 14). Andererseits kann dies Temperaturgesetz selbst bei negativem Δt, Temperatur des Füllgases unter der Lufttemperatur, angewandt werden. So werden bei Nachtfahrten bei klarem Himmel die Gastemperaturen durch die Wärme ausstrahlende Hülle unter die Lufttemperaturen herabdrückt; trotzdem kann ΔG und Δh nach den Formeln 18 und 19 berechnet werden, falls der Ballon prall gehalten wird.

Unsere Kenntnisse der in Wirklichkeit sich einstellenden Gastemperaturen sind leider völlig unzulänglich. Bei der Schwierigkeit, das im Balloninnern angebrachte Thermometer dem Strahlungseinflusse der Hülle genügend zu entziehen, sind die bis jetzt vorliegenden Messungen mit Vorsicht aufzunehmen. Bei

---

[1]) Zur Darstellung gebracht ist die Gleichung 14, die jetzt lautet

$$G = \frac{V \cdot T_0}{n}\left[1 + \frac{s}{1 - s}\,\alpha \Delta t\right]$$

oder in den logarithmischen Koordinaten

$$\log G = \log V + \log T_0 - \log n + \log\left[1 + \frac{s}{1 - s}\,\alpha t \Delta\right].$$

$\log\left[1 + \frac{s}{1 + s}\,\alpha t\right]$ kann mit hinreichender Genauigkeit durch $\frac{s}{1 - s}\,\alpha t$ ersetzt werden. Nach Division mit dem Modul 2,3 erhalten wir 0,00012 für Wasserstoff und 0,00137 für Leuchtgas. Diesen Neigungstangenten und dem Maßstabe der Figur angepaßt sind die gestrichelten Temperaturrichtungslinien gezogen.

Fahrten im Oktober, bei voller Sonne, fanden Besançon und l'Hermite in 1400 m Höhe Gastemperaturen von 45—47° bei Lufttemperaturen von 13—16°, also $\Delta t = 33°$; und wenige Tage später in 2300—2400 m Höhe $\Delta t = 25 - 27°$, Werte, die vermutlich im Sommer bei ungehinderter Einstrahlung weit höher liegen können. Nach Versuchen von v. Siegsfeld soll Δt auf 40°—50° anwachsen können; andererseits fand derselbe im November nach einer klaren Nacht $\Delta t = -13°$. Zu beachten ist, daß das Δt der Formeln 18 und 19 sich nicht auf eine bestimmte Stelle im Ballon bezieht, sondern den mittleren Temperaturüberschuß der ganzen Gasmasse darstellt. Weitere zuverlässige Messungen wären, namentlich mit Rücksicht auf die Theorie der Landung und die Höhensteuerung des Lenkballones, von fundamentaler Bedeutung. Die wichtigsten Schlüsse auf das Intervall, in welchem Δt sich ändern kann, ließen sich ziehen, wenn bei Fahrten, die noch bei praller Sonne beginnen und sich in die Nacht hinziehen, sorgfältige Ballastkontrolle geführt würde, bei Messung der Lufttemperaturen und Höhen (vgl. § 14 Beispiel 41). Die mir bekannten Beschreibungen solcher Fahrten lassen in der einen oder anderen Richtung zu wünschen übrig. Welche Summe wertvollsten Materials hätte bei den Gordon Bennet-Fahrten und anderen Dauerfahrten gewonnen werden können, wenn nicht lediglich Sport getrieben worden wäre!

Da *vermehrte* Strahlung Δt steigert, der Wasserstoffballon gegen *diese* Wirkung 11 mal unempfindlicher ist als der Leuchtgasballon, ist er in fahrtechnischer Hinsicht diesem überlegen; handelt es sich aber darum, die Wirkung der Sonnenstrahlung als vermehrte Tragkraft oder größere Höhe nutzbar zu machen, so ist der Leuchtgasballon weit vorteilhafter. Eine Erhöhung der Gastemperatur um $\Delta t = 40°$ würde seine Normalhöhe um 1000 m erhöhen.

Beispiel 34. Der Ballon Phönix, $V = 1200$ cbm, ist mit Leuchtgasfüllung in 2000 m Höhe bei bedecktem Himmel in einer Gleichgewichtslage. Die Wolkendecke ziehe ab und das Gas steigere seine Temperatur um 25°. Wieviel Meter Höhe gewinnt der Ballon? Wir gehen durch den durch Volumen und Höhe auf der Leuchtgastafel bestimmten Punkt herunter zur Gewichtsskala, legen hier eine Parallele zu den gestrichelten Temperaturrichtungslinien und gehen auf dieser nach links oben durch $\Delta t = 25°$ hindurch und dann wieder vertikal nach oben zur Volumlinie 1200. Durch den Schnittpunkt geht die Höhenlinie 2620 m. Der Höhengewinn betrug somit 620 m. Wir haben lediglich, um die Vorstellung zu fixieren, bestimmte Werte von Ballonvolumen und Höhe angesetzt; der Höhengewinn ist von beiden unabhängig, nur durch Δt bestimmt; wo immer auf der

Tafel wir die Konstruktion ausführen, werden wir zu $\Delta t = 25^0$ deshalb $\Delta h = 620$ m erhalten. Dasselbe ergibt sich auch aus Formel 19a. Nur für den absoluten Gewinn von Tragkraft geht Volumen und Höhe in die Rechnung ein; sie bestimmen das G der Formel 18. Die Höhe ist nur insofern von Einfluß, als in größeren Höhen die Sonnenstrahlung auf ihrem Wege zum Ballon weniger Luftmengen zu durchsetzen hat und somit kräftiger einwirkt. Hätten wir Δh aus der oben gegebenen einfachen Beziehung $25 \cdot \Delta t$ bestimmt, so würden wir 625 m erhalten haben, also beinahe genau dasselbe. Ein Ballon, mit Wasserstoff gefüllt, würde durch dieselbe Strahlungseinwirkung (gleichen Δt) nur um 50 m emporgetrieben worden sein.

Beispiel 35. Der Ballon Pettenkofer, $V = 1440$ cbm, sei mit Leuchtgasfüllung in München, Meereshöhe 520 m, bei 15^0 Lufttemperatur abgewogen; die Gastemperatur betrage 40^0. Wie schwer ist das Gas belastet? — Wir gehen auf der Tafel für Leuchtgas durch den Punkt $V = 1440$, $h = 520$ herunter zur Gewichtsskala und finden 940 kg für die Belastung, falls die Gas und Luft gemeinsame Temperatur 0^0 betragen hätte. Wir nehmen nun erst das Gas auf der Lufttemperatur von 15^0 an, legen dementsprechend durch $G = 940$ eine ausgezogene Temperaturrichtungslinie (§ 12), gehen auf derselben nach links oben und machen bei $t = 15^0$ halt. Auf der Gewichtsskala gehört dazu der Punkt 890 kg; die erhöhte Lufttemperatur hat die Tragkraft um 50 kg herabgesetzt. Durch den Punkt, an dem wir auf der ausgezogenen Temperaturrichtungslinie halt machten, legen wir eine gestrichelte Temperaturrichtungslinie und gehen auf derselben, da der Überschuß der Gastemperatur 25^0 beträgt, um 25^0 hindurch nach rechts hinunter und werden so zu $G = 960$ kg geführt. Dies ist die Belastung; sie ist durch die beiden Temperatureinflüsse nur 10 kg über das zur gemeinsamen Temperatur 0^0 gehörige Gewicht gesteigert worden. Der in Behandlung solcher Aufgaben Gewandtere kann die gestellte Aufgabe durch einfache Überschlagsrechnung erledigen. Im Meeresniveau trägt der Ballon $1440 \cdot 0,7 = 1010$ kg; um auf $520 = 6,5 \cdot 80$ m zu steigen, sind nach dem Ballastgesetz 6,5% der Tragkraft, d. s. 65 kg zu opfern. In München trägt der Ballon also noch 945 kg. Jeder Grad Lufttemperatur setzt (§ 12) die Tragkraft um 4‰ herunter; $15 . 4‰ = 6\%$ von 945 gibt 55 kg, also trägt der Ballon noch 890 kg; und 25^0 Temperaturüberschuß des Gases vermehren um $25 . 3‰ = 7,5\%$ von 890, d. s. 70 kg. Wir werden so wieder auf die Tragkraft von 960 kg geführt.

Würden wir unter denselben Voraussetzungen den Ballon mit Wasserstoff füllen, so würde sich bei 0^0 gemeinsamer Temperatur eine Tragkraft von 1620 kg ergeben; die Lufttemperatur

würde dieselbe um 100 kg herabsetzen, die Gastemperatur um nur 10 kg verbessern; die Tragkraft wird somit 1530 kg. Wir erhalten so eine *Abnahme* um 90 kg, während sich bei Leuchtgasfüllung eine *Zunahme* um 10 kg ergab.

Beispiel 36. Der Ballon Phönix, $V = 1200$ cbm, steigt mit Leuchtgas gefüllt auf. Am Boden herrscht eine Temperatur von 15⁰; in der Atmosphäre soll die Temperatur 0,6⁰ für je 100 m Höhenzunahme abnehmen. Das Gas erwärme sich 30⁰ über die umgebende Luft. In welcher Höhe schwebt der Phönix, wenn die Belastung 548 kg beträgt? In Beispiel 19 fanden wir bei dieser Belastung die Normalhöhe des Phönix zu 3420 m. [Dies wäre die wirkliche Höhe, falls die mittlere Temperatur dieser Luftsäule, Gastemperatur und Temperatur der umgebenden Luft gleich 0⁰ sind.] In 3420 m ergibt sich bei dem angenommenen Temperaturgefälle eine Temperatur von $-5{,}5^0$. Die mittlere Temperatur der Luftsäule ergibt sich somit zu $\frac{15 - 5{,}5}{2} = 4{,}8^0$, statt wie angenommen zu 0^0; die Höhe 3420 erhöht sich also (§ 12) um $4{,}8 \cdot 4^0/_{00} = 2^0/_{00}$, auf 3490 m. In dieser Höhe beträgt die Lufttemperatur -6^0. Wir haben also den Ballon in dieser Höhe schwebend anzunehmen und können nun mit Hilfe der Leuchtgastafel verfahren wie in Beispiel 34. Bequemer und hinreichend genau kommen wir mit Hilfe der Überschlagsrechnung aus. -6^0 Lufttemperatur vermehren die Höhe um $6 \cdot 30 = 180$ m; Temperaturüberschuß des Gases nochmals um um $30 \cdot 25 = 750$ m, so daß die wirkliche Höhe des Phönix 4420 m beträgt. Wollten wir genauer rechnen, so hätten wir zu beachten, daß in dieser Höhe eine Lufttemperatur von -9^0 statt der angenommenen -6^0 herrscht; wir hätten also die Höhe nochmals um $3 \cdot 30 = 90$ m, das sind $2^0/_0$ ihres Wertes aufzubessern. Aber diese Genauigkeit ist vollständig illusorisch. Erstens sind wir vor der Fahrt nicht über den Temperaturzustand in der Atmosphäre unterrichtet, können also den Temperaturgradienten nur schätzen; und zweitens ist die Temperatur des Füllgases unbekannt. Durch leichte Trübung der Atmosphäre verminderte Sonnenstrahlung kann dieselbe bedeutend reduzieren. Für die Theorie der Führung kommt es auch weit weniger auf die absoluten Werte von Höhe und Tragkraft an, als klar zu sehen, wie solche durch äußere Ursachen geändert werden.

Beispiel 37. In Beispiel 25 ließen wir 5 Ballone eine Wettfahrt in bezug auf Höhe unternehmen, berechneten die Normalhöhen und die Zusatzballastmengen, die zur Abstimmung auf gleiche Höhe nötig sind. Wir stellen die Resultate hier nochmals zusammen.

Ballon	O	Georg	Reiher	Pettenkofer	Möve
Volumen	637	1080	1180	1440	1550 cbm
Füllung	Wasserstoff	Leuchtgas	L.G.	L.G.	L.G.
Belastung	343	436	461	521	541 kg
Normalhöhe	6380	4400	4660	5275	5540 m
Zusatzballast	95	—	15	60	85 kg

Die Fahrt war bei Abwesenheit der Sonnenstrahlung angenommen, die Gastemperatur wurde gleich der Lufttemperatur gesetzt und für die Bewertung und Handikapierung die Normalhöhe zugrunde gelegt. Wir nehmen nun an, die Sonnenstrahlung kommt zur Geltung, indem sie die Gastemperatur um 40° über die Lufttemperatur heraufsetzt. Am Boden herrsche eine Temperatur von 15°; die Temperaturabnahme in der Atmosphäre betrage 0,6° auf 100 m. Welches sind die zu erwartenden Steighöhen, und wie muß handikapiert werden?

Unter den angenommenen Voraussetzungen finden wir in den Normalhöhen Lufttemperaturen von

$$-23^0,\ -11{,}5^0,\ -13^0,\ -17^0 \text{ und } -18^0;$$

die Mitteltemperatur der Luftsäule bis zu dieser Höhe ergibt sich zu

$$-4^0,\ +3^0,\ +1^0,\ -1^0,\ -1{,}5^0.$$

Dadurch ändern sich (s. Beispiel 36) die Normalhöhen um — 100, + 50, + 20, — 20 und — 30 m; in diesen neuen Höhen finden sich die Lufttemperaturen, die wir hinreichend genau gleich den Temperaturen in den Normalhöhen setzen können. Wir können nun für die weitere Ausführung unsere Tafeln benützen oder auch genügend genau das abgekürzte Rechnungsverfahren (s. Beispiel 36). Durch Einfluß der Lufttemperaturen ändern sich die Höhen pro Grad um 30 m in entgegengesetztem Sinne; dies ergibt somit Änderungen von + 690, + 340, + 390, + 510 und + 540 m. Die um 40° erhöhte Gastemperatur vermehrt die Höhe des Wasserstoffballones um 80, die der Leuchtgasballones um 1000 m. Die zu erwartenden Steighöhen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Wir haben zur Handikapierung auf die Steighöhe des Reiher 5790 m auszugleichen. Wir benutzen dazu das Ballastgesetz, daß sich die Höhe um 80 m ändert für jede Gewichtsverminderung um 1% (Formel 15), und berechnen danach die Ballastmengen, die jeder Ballon auszugeben hat, um von 5790 m auf seine berechnete Höhe aufzusteigen, wodurch wir die zum Ausgleich erforderlichen Mengen unangreifbaren Ballastes erhalten. So ergibt sich folgendes Bild:

Ballon	O	Georg	Reiher	Pettenkofer	Möve
Normalhöhe	6380	4400	4660	5275	5540 m
Temperatur in dieser Höhe	— 23°	— 11,5°	— 13°	— 17°	— 18°
Höhe mit Berücksichtigung der Lufttemperaturen	6970	4790	5070	5760	6050 m
Steighöhen	7050	5790	6070	6760	7050 m
Zusatzballast zur Handikapierung	45	—	15	60	90 kg.

Wir sehen, daß die Bewertung nach der Normalhöhe dasselbe Bild gibt wie die Bewertung mit Rücksicht auf die Lufttemperaturen; auch die entsprechende Handikapierung würde die Ballones mit einer für die Praxis längst ausreichenden Genauigkeit (sind wir doch im Ungewissen über die Temperaturen von Gas und Luft) auf die Höhe des Georg, 4790 m, abstimmen. Unter Berücksichtigung der Sonnenstrahlung ist das Bild stark geändert. Der Wasserstoffballon O hat seine große Überlegenheit eingebüßt und ist von der Möve erreicht worden. Er würde weit schlechter abschneiden, wenn er nicht schon durch seine Normalhöhe in sehr kalte, tragfähige Luftschichten emporgeführt worden wäre. In bezug auf Ballastmitgabe ist er von der ersten an die dritte Stelle gerückt; so sehr kommt dem Leuchtgasballon die erwärmende Wirkung der Sonnenstrahlung zugute.

Die beiden zuletzt behandelten Beispiele zeigen, wie überaus durchsichtig bei hinreichender Genauigkeit sich diese und ähnliche Aufgaben durch Einführung der Normalhöhe und zweier Temperaturfaktoren behandeln lassen.

Wenn wir die Normalhöhe mit $\mathfrak{H}_n$, die mittlere Lufttemperatur bis zu dieser Höhe mit t_m, die Lufttemperatur in der so reduzierten Höhe mit t, die Gastemperatur mit t' bezeichnen, ergibt sich somit die Steighöhe $\mathfrak{H}$ zu

20) $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}_n (1 + \alpha t_m) - 30t + 2t'$ m für Wasserstoff-
$= \mathfrak{H}_n (1 + \alpha t_m) - 30t + 25t'$ m für Leuchtgasfüllung.

§ 14. Einfluß der Gastemperatur auf die Tragkraft und Prallhöhe eines Ballones konstanten Gasgewichtes. Überwerfen.

I. Tragkraft.

Der Ballon konstanten Gasgewichtes schwebt (vgl. § 7) im indifferenten Gleichgewichte, so lange die Temperaturdifferenz zwischen Gas und Luft sich nicht ändert; seine Stabilität nach oben oder unten ist Null. Die geringste Steig- oder Sinkkraft

führt ihn nach oben oder unten durch das ganze Höhenintervall hindurch, das er ohne Gasabgabe durchlaufen kann.

Füllen wir in eine Hülle $\mathfrak{V}_0$ Kubikmeter eines Gases vom spezifischen Gewicht s, der Temperatur 0^0 und dem Drucke 760 mm ein, so ist dessen Tragkraft in Luft von gleicher Temperatur:

$$\text{Tragkraft} = \mathfrak{V}_0 \rho_0 - \mathfrak{V}_0 \rho_0 s = \mathfrak{V}_0 \rho_0 (1 - s) = \mathfrak{V}_0 \, 1{,}293 \, (1 - s) \text{ kg}.$$

$\mathfrak{V}_0 \rho_0$ gibt den Auftrieb, d. h. das Gewicht der verdrängten Luft. Ändern wir nun die gemeinsamen Werte von Druck und Temperatur, so ändern sich Volumen $\mathfrak{V}$ und Luftdichte ρ, aber so, daß $\mathfrak{V}\rho$ konstant gleich $\mathfrak{V}_0 \rho_0$ bleibt (vgl. § 6). Wir haben also stets die Tragkraft

$$\text{Tragkraft} = \mathfrak{V}\rho \, (1 - s) = \mathfrak{V}_0 \, 1{,}293 \, (1 - s) \text{ kg},$$

wobei $V\rho$ den konstanten Auftrieb von $V_0 \, 1{,}293$ kg bedeutet. Und führen wir noch ein die Normaltragkraft T_0 des Kubikmeters, $\mathrm{T}_0 = \rho_0 (1 - s)$, (vgl. § 9), so erhalten wir

21) $$\text{Tragkraft } G = \mathfrak{V}\rho \, (1 - s) = \mathfrak{V}_0 \mathrm{T}_0 \text{ Kilogramm},$$

unabhängig von Druck und gemeinsamer Temperatur, *so lange die Masse (Gasgewicht) konstant bleibt.*

Da das Volumen $\mathfrak{V}$ der Gasmasse wechselt, die Masse aber konstant bleibt, ist es oft zweckmäßiger, die Tragkraft auszudrücken durch das Gewicht der Gasfüllung. Ist die Dichte des Gases ρ', so nimmt 1 kg einen Raum ein von $\frac{1}{\rho'}$ cbm; dieser Raum, angefüllt mit der verdrängten Luft von der Dichte ρ, wiegt $\frac{\rho}{\rho'}$ Kilogramm. Stehen Gas und Luft unter gleichem Druck und sind sie auf gleicher Temperatur, so ist $\rho' = \rho s$ (vgl. § 1), und wir haben

22) $$\text{Tragkraft eines Kilogramms} = \frac{1}{s} - 1 = \frac{1 - s}{s} \text{ kg}.$$

Daraus ergibt sich die

Tragkraft eines Kilogramms Wasserstoffgas = 13,48 kg,
Tragkraft eines Kilogramms Leuchtgas = 1,19 kg.

(Für andere Gase s. Tabelle der Gaskonstanten.)

Sind in die Hülle Q Kilogramm Gas eingefüllt, so ergibt sich die Tragkraft dieser Gasmasse

23) $$\text{Tragkraft } G = \frac{Q}{s} (1 - s) \text{ kg}.$$

Darin bedeutet $\frac{Q}{s} = V\rho$ *das konstant bleibende Gewicht der verdrängten Luft, den Auftrieb.*

Wir erhalten so einen neuen, lehrreichen Einblick in den inneren Mechanismus des Steigens eines *prallen* Ballones. Da die Tragkraft eines Kilogramms der Füllung unabhängig von der Höhe ist, ergibt sich der Satz:

Für jedes Kilogramm in beliebiger Höhe abgegebenen Ballastes steigt ein prall gefüllter Ballon eine Strecke empor der Art, daß $\frac{1}{13{,}48} = 0{,}074$ kg *Wasserstoffgas, resp.* $\frac{1}{1{,}19} = 0{,}839$ kg *Leuchtgas entweichen. Stets stehen die Gewichte der Füllung und Belastung in dem Verhältnis 1 : 13,48, resp. 1 : 1,19.*

Formel 21 gibt die Anzahl Kubikmeter an, die in einen Ballon eingefüllt werden müssen, damit er bei der Abfahrt mit der Belastung G Kilogramm gerade abgewogen ist; gleiche Temperatur von Gas und Luft (Fehlen von Strahlungseinflüssen) vorausgesetzt. Allerdings erhalten wir das Volumen $\mathfrak{B}_0$, das der gemeinsamen Temperatur 0^0 entspricht; ist sie $\pm t^0$, so haben wir $\mathfrak{B}_0$ um $\pm t \cdot 4\text{‰}$ zu vergrößern. Wird nun die geringste Steigkraft gegeben, so steigt der Ballon (falls sich das Gas nicht durch Strahlung unter die Temperatur der umgebenden Luft abkühlt) empor bis zu seiner *Prallhöhe*.

II. *Die Prallhöhe*. Unter der *Normalprallhöhe* verstehen wir die Höhe, die ein Ballon erreichen muß, damit die bis dahin konstante Gasmasse den größten, im Ballon verfügbaren Raum V einnimmt, Temperaturen von Gas und Füllung zu 0^0 angenommen. Um die bei der gemeinsamen Temperatur $\pm t^0$ vorhandene Prallhöhe zu erhalten, haben wir statt V offenbar nur ein Volumen anzusetzen, das bei Änderung seiner Temperatur von 0^0 auf $\pm t^0$ gleich V wird; wir finden dies, indem wir V um $\pm t \cdot 4\text{‰}$ verkleinern oder vergrößern. Da eine Änderung des Volumens um $\pm 4\text{‰}$ aber auch erreicht werden kann, indem wir um 30 m auf- oder absteigen (§ 2), haben wir den Satz:

Bei der Gas und Luft gemeinsamen Temperatur $\pm t^0$ *liegt die Prallhöhe* $\pm 30 \cdot t$ *Meter unter der Normalprallhöhe.*

Die Normalprallhöhe läßt sich leicht finden. Nimmt (stets bei 0^0) das Gas beim Drucke b_1 ein Volumen $\mathfrak{B}_1 = \frac{V}{m_1}$ ein, bei dem kleineren Drucke b_2 ein Volumen $\mathfrak{B}_2 = \frac{V}{m_2}$, so verhalten sich $b_1 : b_2 = \mathfrak{B}_2 : \mathfrak{B}_1 = m_1 : m_2$; um den durch die Volumen $\mathfrak{B}_1$ und $\mathfrak{B}_2$ gegebenen Höhenunterschied zu erhalten, bilden wir eine Höhenzahl (§ 3)

$$n = \frac{b_1}{b_2} = \frac{m_1}{m_2}$$

und entnehmen der Tabelle der Höhenzahlen den zugehörigen Höhenunterschied. Um die Prallhöhe zu finden, haben wir

$m_2 = 1$, ($\mathfrak{V}_2 = V$) zu setzen und erhalten die Normalprallhöhe eines Ballones, dessen Füllung den m Teil des Volumens einnimmt, in einer Höhe, die um die durch die Höhenzahl

$$n = \frac{1}{m}$$

bedingte Strecke höher liegt. Wie wir die Prallhöhe mit Hilfe der Tafeln finden, wird in Beispiel 39 gezeigt werden.

III. *Einfluß der Gastemperatur.* Zur Geltung kommt das Temperaturgesetz 4 des § 11: Ändert ein konstantes Gasgewicht seine Temperaturdifferenz gegen die umgebende Luft um $\pm \Delta t^0$, so ändert sich seine Tragkraft um $\pm \Delta t \cdot 4^0/_{00}$ des *Auftriebs.*

Für den Auftrieb, d. i. das Gewicht der verdrängten Luft, fanden wir unter I. zwei Ausdrücke; setzen wir für $4^0/_{00}$ wieder α ein, so erhalten wir für die Änderung der Tragkraft ΔG, bei Änderung der Temperaturdifferenz um $\pm \Delta t^0$

24) $$\Delta G = \pm \mathfrak{V} \rho \alpha \Delta t = \pm 1{,}293\, \mathfrak{V}_0 \alpha \Delta t = \pm \frac{Q}{s} \alpha \Delta t \text{ Kilogramm.}$$

Die Änderung der Tragkraft ist die größtmögliche, die bei einem Ballon eintreten kann. Alle anderen bis jetzt behandelten Temperatureinflüsse wirkten mit $4^0/_{00}$ pro Grad auf Tragkraft oder Gasgewicht, dieser aber auf das Gewicht der verdrängten Luft. *Ein Unterschied der Gasart ist nicht mehr vorhanden.* Der Leuchtgasballon, der als Ballon konstanten Volumens auf Gastemperaturänderung sich elfmal empfindlicher gezeigt hat als der Wasserstoffballon, verhält sich bei konstantem Gasgewichte genau wie dieser. (Die Gasart geht durch s im letzten Glied der Gleichung 24 nur scheinbar ein, da Q und s sich proportional sind; $\frac{Q}{s} = \mathfrak{V}\rho$). Für manche Zwecke der Anwendung ist es bequemer, ΔG im Verhältnis zu G selber auszudrücken. Berücksichtigen wir die für G gegebenen Ausdrücke (22) oder (23), so erhalten wir mit Hilfe 24:

25) $$\Delta G = \pm \frac{1}{1-s} \alpha \Delta t \cdot G \text{ Kilogramm}$$

$$\frac{1}{1-s} = 1{,}074 \text{ für Wasserstoff}$$

$$= 1{,}841 \text{ für Leuchtgas.}$$

Damit ergibt sich

25 a) $$\Delta G = \pm\, 0{,}0039\, \Delta t \cdot G \text{ für Wasserstoff}$$

$$= \pm\, 0{,}0067\, \Delta t \cdot G \text{ für Leuchtgas.}$$

(Die Gasart geht hier nur scheinbar ein, denn G und $1 - s$ sind bei gleichem Volumen $\mathfrak{V}$ beider Gasarten sich proportional).

ΔG läßt sich aus (24) oder (25) leicht berechnen. Wir können den Wert aber auch unseren Tafeln entnehmen. Da die Tafeln nach Gleichung 25 konstruiert sind, haben wir das der betreffenden Gasart zugehörige Blatt zu wählen. Die horizontalen Temperaturlinien zu beiden Seiten der G-Achse sind durch strichpunktierte, schief von links oben nach rechts unten verlaufende, unter sich parallele Temperaturrichtungslinien durchsetzt. Wir legen durch das in Frage kommende G eine solche Linie, gehen auf ihr in richtigem Sinne durch das Temperaturintervall Δt hindurch und entnehmen der G-Achse das zugehörige ΔG[1]).

Diese Änderung ΔG dürfen wir nicht wie das entsprechende ΔG der Gleichung 16 mit Hilfe des Ballastgesetzes in Höhe umsetzen. Die geringste Steig- oder Sinkkraft, $\pm \Delta G$, führt den Ballon in seine Prallhöhe empor oder bringt ihn zur Landung, falls nicht, etwa durch variable Strahlung oder starke Temperaturänderung in der Atmosphäre, ΔG unterwegs verschwindet.

Dabei haben wir zu achten, daß die Prallhöhe nun bestimmt ist durch das der Gastemperatur t^0 entprechend geänderte Gasvolumen $\mathfrak{B}$. ($\Delta \mathfrak{B} = \pm \alpha t^0 \, 4\permil \, \mathfrak{B}$). Dazu ändern wir t^0 entsprechend das zur Verfügung stehende Ballonvolumen V um $\Delta V = \mp t \, 4\permil \, V$. Jede Änderung ΔV um $4\permil$ kann durch eine Höhenänderung um 30 m ersetzt werden (vgl. oben II: Prallhöhe.) Wir haben also den Satz:

Beträgt die Gastemperatur $\pm t^0$, so wird dadurch die Prallhöhe des Ballones konstanten Gasgewichts um 30 · t Meter tiefer resp. höher gelegt.

Die Änderung der Tragkraft eines prall in seiner Gleichgewichtslage schwebenden Ballones durch eintretende Abkühlung des Gases ist außerordentlich viel größer wie deren Zunahme bei gleicher Erwärmung. Im ersteren Falle ist sie proportional dem Gewichte der verdrängten Luft, $V\rho$, (denn der Ballon wird schlaff), in letzterem

---

1) Zur Darstellung ist gebracht die Gleichung 14 die jetzt lautet:

$$G = \frac{\mathfrak{B}_0 T_0}{n}\left(1 + \frac{1}{1-s}\,\alpha\,\Delta t\right)$$

oder im logarithmischen Koordinaten

$$\log G = \log \mathfrak{B}_0 + \log T_0 - \log n + \log\left(1 + \frac{1}{1-s}\,\alpha\,\Delta t\right)$$

$\log\left(1 + \frac{1}{s-1}\,\alpha\,\Delta t\right)$ ist gleich $\frac{1}{1-s}\,\alpha t$ gesetzt; Division durch den Modul 2,3 gibt 0,00284 für Leuchtgas und 0,00170 für Wasserstoffgas. Diesen Neigungswinkeln im Maßstabe der Zeichnung Rechnung tragend sind die strichpunktierten Linien eingezeichnet.

Falle proportional dem Gasgewichte $V\rho s$ (denn der Ballon bleibt prall); sie verhalten sich also wie 1 : s. Die bei eintretender Abkühlung des Gases eintretende Abnahme der Tragkraft ist beim Leuchtgasballon $\frac{1}{0,456} = 2,2$, beim Wasserstoffballon $\frac{1}{0,069} = 14,5$ mal größer wie deren Zunahme bei Erwärmung des Gases um denselben Betrag.

IV. *Überwerfen.* Erleidet die Füllung eines in einer Gleichgewichtslage schwebenden Freiballones eine Abkühlung, so verwandelt sich derselbe durch Einschrumpfen des Gases in einen Ballon konstanten Gasgewichtes. Wie die bei dieser Umwandlung durch die Temperaturänderung $-\Delta t^0$ bewirkte Verminderung an Tragkraft zu berechnen ist, wird unten in Beispiel 42 gezeigt. Die so erworbene Sinkkraft bringt den Ballon, falls er nicht in neue Temperaturverhältnisse eintritt, zur Landung; soll diese vermieden werden, so hat der Führer durch Ballastausgabe einzugreifen. Nur durch Zufall könnte es ihm gelingen, diese so zu bemessen, daß die Sinkkraft genau aufgehoben und der Fall des Ballones bald unmerklich wird. (Vgl. § 17.) Zu geringe Ballastabgabe ist ausgeschlossen, da dadurch der beabsichtigte Zweck des Abfangens nicht erreicht wird; stets wird der Führer einen kleinen oder größeren Überschuß an Ballast ausgeben, er wird, wie der technische Ausdruck lautet, „überwerfen". Der Ballon erhält dadurch Steigkraft; er kehrt in seine Ausgangslage (Prallhöhe) zurück, wobei die Steigkraft, da er ja bis dahin Ballon konstanten Gasgewichtes ist, ihren Wert unverändert beibehält und ihn schließlich über dieselbe hinaustreibt, bis sie nach dem Ballastgesetz verschwunden ist. Diese Überschreitung der ursprünglichen Höhe wird vergrößert, wenn mittlerweile die Ursache, die dem Ballon seine Sinkkraft gab, verschwunden ist; die neue Höhe ist dann dieselbe, als wäre die *ganze* Ballastmenge in der Ausgangshöhe ausgegeben worden. Muß ein Fall des Ballones durch größere Strecken hindurch abgebremst werden, etwa bei der Landung, oder wie es sich auch bei Unaufmerksamkeit des Führers ereignen kann, so können dazu größere Ballastmengen nötig sein; dabei kann der Führer, namentlich bei einiger Nervosität, um größere Beträge überwerfen. Allein auch die kleinen Ballastausgaben, die bei den niemals ganz konstanten Strahlungs- und Temperaturverhältnissen notwendig sind, werden unvermeidlich stets von geringem Überwerfen begleitet sein. Die Fahrthöhe steigt mit jeder Ballastausgabe; die ganze während der Fahrt ausgegebene Ballastausgabe hat schließlich nur dazu gedient, den Ballon nach dem Gesetz der Ballastwirkung in seine schließliche Maximalhöhe emporzutreiben. Je variabler die Strahlungs- und Temperaturverhältnisse sind, desto mehr muß durch Ballast-

ausgabe eingegriffen werden, wobei stets Überwerfen stattfindet, und desto mehr verkürzt sich die Dauer der Fahrt. Die konstanteren Strahlungsverhältnisse während einer Nachtfahrt lassen bei geringem Ballastopfer den Ballon in wenig wachsender Höhe schweben, sobald er sich beim Übergang vom Tag zur Nacht den neuen Verhältnissen einmal angepaßt hat; Ballastausgabe und damit verbundenes Überwerfen findet seltener statt, und es steigt die Dauer der Fahrt.

In bezug auf Überwerfen tritt nun eine gewaltige Überlegenheit des Wasserstoffballones über den Leuchtgasballon zu Tage. Denn bei beiden Ballonen wird der Führer, namentlich wenn er geringen Fall abbremst, um dieselben *absoluten* Beträge überwerfen. Die Wirkung gleicher, absoluter Ballastausgabe bemißt sich aber (Formel 15) durch ihr Verhältnis zur Belastung. Letztere ist unter gleichen Umständen beim Wasserstoffballon $\frac{1,2}{0,7} = 1,7$, also 70% größer als beim Leuchtgasballon. Die Überschreitung der früheren Gleichgewichtslage durch Überwerfen wird somit beim Wasserstoffballon durchschnittlich um 70% geringer sein wie beim Leuchtgasballon. In diesem Verhältnis weniger hebt sich im Verlaufe der Fahrt die Fahrtkurve, ist der Gasaustritt und der Verlust an Tragkraft geringer. In diesem Verhältnis etwa verlängert sich die Fahrtdauer, und hält sich der Ballon leichter in einer einmal erreichten Höhe. *Dies um 70% geringere Reagieren auf Überwerfen ist der Grund, weshalb in fahrtechnischer Beziehung der Wasserstoffballon dem Leuchtgasballon so außerordentlich überlegen ist.*

Um Mißverständnissen vorzubeugen, sei darauf aufmerksam gemacht, daß die Überschreitung der ursprünglichen Gleichgewichtslage durch Überwerfen weit größer sein kann als der Wert, der sich nach dem Ballastwirkungsgesetz berechnen läßt. Ist ein Fall eingeleitet durch beträchtliche Abkühlung, also beträchtliche Volumverminderung des Gases, oder Ventilzug, so liegt, falls durch Überwerfen der Ballon wieder zurücksteigt und die Abkühlung des Gases inzwischen nicht verschwunden ist, die Prallhöhe selbstverständlich über der Ausgangshöhe, für jeden Grad Abkühlung des Gases um 30 m, und erst von dieser neuen Prallhöhe ab darf nach dem Ballastwirkungsgesetz gerechnet werden. Schon minimalstes Überwerfen würde den Ballon in diese neue Prallhöhe, die um große Beträge über der Ausgangshöhe liegen kann, emporführen (vgl. unten Beispiel 40). Der Vorteil des Wasserstoffballones zeigt sich selbstverständlich nur in bezug auf denjenigen Betrag der Erhöhung der Gleichgewichtslage, die sich nach der Ballastformel berechnen läßt.

Beispiel 38. Ein Ballon, $V = 800$ cbm, sei in München,

Höhe 520 m, bei einer Temperatur von 15^0 mit 700 cbm Wasserstoffgas gefüllt und abgewogen. Er werde in die Sonne gestellt, wodurch sich die Gastemperatur 20^0 über die Lufttemperatur steigert. Wieviel gewinnt er an Steigkraft? — Die 700 cbm ändern ihre Tragkraft nicht, wenn wir die Gas und Luft gemeinsame Temperatur von 15^0 auf 0^0 herabsetzen. (Temperaturgesetz 1.) Dadurch zieht sich das Gas um 15.4‰, d. s. 40 cbm, also auf 660 cbm zusammen. Auf der Tafel des Wasserstoffballones gehen wir vom Wasserstoffvolumen $V = 660$ horizontal zur Höhenlinie 520 und finden vertikal durch den Schnittpunkt heruntergehend $G = 742$ kg. (Dies ist die Belastung in der Halle.) Durch diesen Punkt $G = 742$ legen wir eine strichpunktierte Temperaturrichtungslinie, verfolgen diese durch 20^0 nach rechts herunter; das neue G ergibt sich zu 800 kg. Der Gewinn an Steigkraft beträgt also 58 kg = 5 Sek. Entsprechend hätte Formel 25a) $\Delta G = 0{,}0039 \cdot 20 \cdot 742 = 58$ ergeben. Hätten wir mit Leuchtgas gefüllt, so würde die gleiche Konstruktion auf der Tafel für Leuchtgas (oder Formel 25a) eine Steigerung der Tragkraft von 432 auf 490 kg, also um denselben Betrag, ergeben haben.

Wäre ein kleinerer Ballon mit 700 cbm in der Halle *prall* gefüllt gewesen, so hätten wir (vgl. Beispiel 31) für ihn mit Wasserstoffüllung in der Sonne die Vermehrung der Steigkraft nur 4 kg, also 14,5 mal kleiner, für Leuchtgasfüllung nur 27 kg, also 2,2 kleiner (vgl. oben S. 57) erhalten.

Beispiel 39. Der Phönix, $V = 1200$ cbm, erhält in München, Meereshöhe 520 m, 800 cbm Wasserstoffgas. Mit welcher Belastung ist er abgewogen und welches ist seine Normalprallhöhe? 800 cbm Wasserstoff haben eine Normaltragkraft von 960 kg. Zu 520 m gehört die Höhenzahl 1,067; also ist die Tragkraft $\frac{960}{1{,}067} = 900$ kg (vgl. Beispiel 20). Da der Ballon zu $\frac{2}{3}$ gefüllt ist ($m = \frac{2}{3}$, siehe oben II) ist die Prallhöhe gegeben durch die Höhenzahl $n = \frac{3}{2} = 1{,}5$; wozu die Höhendifferenz 3240 m gehört. Die Prallhöhe liegt also in $520 + 3240 = 3760$ m Meereshöhe. Um die Aufgabe mit Hilfe der Tafeln I und II zu behandeln, gehen wir auf der Volumlinie 800 zur Höhenlinie 520 und lesen auf der Gewichtsskala 900 kg ab. Da während des Aufstieges die Tragkraft konstant bleibt, gehen wir durch $G = 900$ vertikal nach oben und können so zu jeder Höhe das Volumen, auf welches sich das Gas ausgedehnt hat, ablesen. Bei 5670 m ist das Volumen 1200 cbm geworden, also die Normalprallhöhe erreicht. Dabei sind alle Temperaturen $= 0^0$ angenommen worden. Bei

Aufgaben dieser Art pflegt man, trotz ihres bedeutenden Einflusses in der Praxis abzusehen von den von 0^0 verschiedenen Temperaturen, da die Zahl der eingefüllten Kubikmeter meistens nicht mit großer Genauigkeit bekannt ist. Ist die Luft von der Temperatur t^0, das Gas von der Tempertur t'^0, so kann man, um den Einfluß dieser Temperatur zu finden, wie in Beispiel 38 verfahren oder den Ballon auffassen als Ballon von dem *konstanten* Volumen 800 cbm, wodurch wir auf das bereits in § 13 behandelte Temperaturproblem (vgl. Beispiel 35) zurückgeführt werden. Für $t = 10^0$, $t' = 30^0$ finden wir die Tragkraft auf 870 kg herabgesetzt. [Hätten wir 800 cbm Leuchtgas eingefüllt, so ergäbe sich bei 0^0 gemeinsamer Temperatur eine Tragkraft von 525 kg, die durch die angenommene Temperatur auf 545 kg erhöht wird).

Ist in der Prallhöhe die Temperatur des Gases 30^0, so wird dadurch die Normalprallhöhe um 900 m tiefer gelegt; sie findet sich dann in 2860 m, unabhängig von der Art der Füllung.

Hätten wir in München, bei der gemeinsamen Temperatur von 0^0, den Phönix prall gefüllt, so hätte er, der Mehrfüllung von 400 cbm Wasserstoff entsprechend, 450 kg mehr tragen können. Aber um die Prallhöhe zu erreichen, hätte dies ganze Plus an Tragkraft in Form von Ballast ausgegeben werden müssen, denn in einer bestimmten Höhe ist die Tragkraft durch das Gasvolumen und die Temperaturen eindeutig bestimmt, unabhängig von der Vorgeschichte des Ballones.

Beispiel 40. Der Phönix, $V = 1200$ cbm, geht mit Leuchtgasfüllung aus 3000 m Höhe zur Landung über; der Fall sei durch minimale Abkühlung des Gases eingeleitet worden. Beim Abbremsen des Falles gibt der Führer einen Sack zu 12 kg Ballast zu viel aus. Wie hoch steigt der Phönix, falls der Führer das Überwerfen nicht durch Ventilzug korrigiert? Der Ballon kehrt zurück in die Ausgangshöhe, ist in dieser wieder prall geworden und überschreitet sie nun gemäß der Wirkung einer Ballastausgabe von 12 kg. Wir nehmen für diesen Zweck mit hinreichender Genauigkeit Gas und Luft auf der gemeinsamen Temperatur 0^0 an und finden dann mit Hilfe der Tafeln die Belastung des Phönix in 3000 m zu 580 kg. Die Überschreitung dieser Höhe ergibt sich (Formel 15) zu $\Delta h = 8000 \frac{12}{580} = 165$ m; der Phönix steigt somit auf 3165 m.

Mit Wasserstoffüllung ergibt sich die Belastung in der Ausgangshöhe zu 990 kg und die Überschreitung nur zu $\Delta h = 8000 \frac{12}{990}$ $= 95$ m, also 70% weniger. (Vgl. das oben über den Vorteil des Wasserstoffballones Auseinandergesetzte).

Beispiel 41. Der Ballon Pettenkofer, $V = 1440$ cbm, soll mit Wasserstoffüllung eine Hochfahrt antreten und dabei rasch eine Gleichgewichtslage in 5000 m Höhe erreichen. Um rasch zu steigen, erhält er bei der Abfahrt 4 Sack à 20 kg = 80 kg Steigkraft. Welches ist die *geringste* Wasserstoffmenge, die zur Füllung verwandt werden muß? Wir finden mit Hilfe der Tafeln (vgl. Beispiel 20), daß der Pettenkofer in 5000 m Höhe mit 925 kg belastet sein kann. Wir haben somit bei der Abfahrt Gas zu füllen, so daß die Tragkraft des Ballones 925 + 80 = 1005 kg beträgt; das sind 840 cbm. Der Pettenkofer steigt so mit konstanter Steigkraft bis in seine Prallhöhe von 4330 m, seine Steigkraft hebt ihn nach der Ballastformel noch 670 m höher auf 5000 m.

V. *Übergang von der Tag- zur Nachtfahrt.* Wird eine Fahrt in den Morgenstunden angetreten, so ist der Ballon bei klarem Himmel bis zur Zeit des höchsten Sonnenstandes vermehrter Strahlung ausgesetzt, und die Füllung steigert ihre Temperatur relativ zur umgebenden Luft. Unter Einfluß dieser Strahlungszunahme wird der Freiballon seine Gleichgewichtslage stetig erhöhen, wobei, da wir es stets mit einem Ballon konstanten Volumens zu tun haben, der Leuchtgasballon sich die gleiche Temperaturzunahme elfmal mehr zunutze machen kann, wie der Wasserstoffballon (vgl. § 13). Gänzlich anders aber liegen die Verhältnisse, wenn der Ballon seine Fahrt in die Abend- oder Nachtstunden hinein fortsetzt. Die Gastemperatur sinkt, das Gasvolumen wird kleiner, und der Ballon verwandelt sich in einen Ballon konstanten Gasgewichtes. Zur Anwendung kommt jetzt das Temperaturgesetz 4, in dem ein *Unterschied der Füllart sich nicht mehr geltend macht.* Um den mit Abnahme der Gastemperatur verbundenen Verlust an Tragkraft auszugleichen, muß Ballast geopfert werden, bis sich der Ballon allmählich den neuen Strahlungsverhältnissen angepaßt hat. Je höher die Gastemperatur bei Tage war und je tiefer sie bei Nacht wird, desto größer wird die notwendige Ballastausgabe. *Die Ballastausgabe, die notwendigerweise mit dem Übergang von der Tag- zur Nachtfahrt verbunden ist, ist dieselbe für den Leuchtgas- und den Wasserstoffballon und nur bestimmt durch Volumen und Fahrthöhe.* Denn ändert sich (Temperaturgesetz 4) die Temperatur des Ballones konstanten Gasgewichts um $\pm \Delta t^0$ gegenüber der umgebenden Luft, so ist die Änderung der Tragkraft $\pm \Delta t \, 4\text{‰}$ des Auftriebes, d. i. des Gewichtes $V\rho$ der verdrängten Luft (vgl. Formel 24). In der folgenden kleinen Tabelle ist für einige gebräuchliche Ballongrößen das Produkt $\alpha \cdot V\rho$ Kilogramm angegeben, in verschiedenen Höhen, in welchen der Ballon prall ist, in welchen Höhen demnach das Gas die Temperaturerniedrigung Δt erleiden soll.

Tabelle der verdrängten Luftgewichte multipliziert mit α.

Höhe m	600 cbm	1000 cbm	1440 cbm
	kg	kg	kg
0	2,84	4,74	6,82
500	2,67	4,45	6,41
1000	2,51	4,18	6,02
1500	2,36	3,93	5,66
2000	2,21	3,69	5,32
2500	2,08	3,47	5,00
3000	1,95	3,26	4,69
3500	1,84	3,06	4,41
4000	1,72	2,87	4,13
4500	1,62	2,70	3,88
5000	1,52	2,53	3,64

Die Temperatur der Luftschichten in diesen Höhen ist dabei mit genügender Genauigkeit zu 0° angenommen. Erleidet beispielsweise ein 1000 cbm-Ballon in 1000 m Höhe prall im Gleichgewicht eine Erniedrigung seiner Temperaturdifferenz gegen die tragende Luft im Betrage von 15°, so erhält er dadurch eine Sinkkraft im Betrage von $15 \cdot 4{,}18 = 62{,}7$ kg, *unabhängig von der Art der Füllung.* Dieselbe Sinkkraft ergibt sich selbstverständlich, wenn wir nach bekannten Methoden die Tragkraft des Ballones in dieser Höhe berechnen und nun die Formeln 25 oder 25a anwenden (wobei sich wieder Unabhängigkeit von der Art der Füllung ergibt) oder indem wir die Tafeln benützen (vgl. Beispiel 38). Allein für die meisten Anwendungen ist bei längst hinreichender Genauigkeit der Gebrauch dieser kleinen Tabelle bequemer. Wir sehen, daß dieselben Temperaturstörungen um so geringer wirken, in je größerer Höhe der Ballon schwebt. Da dieselben mit der Entfernung von der Erdoberfläche abnehmen, folgt, daß mit zunehmender Fahrthöhe der Ballon von Störungen immer weniger beeinflußt wird; je niedriger die Fahrthöhe, desto schwieriger die Führung eines Ballones.

Beispiel 42. Angenommen der Ballon Pettenkofer, $V = 1440$ cbm, sei zur Zeit des höchsten Sonnenstandes prall in einer Gleichgewichtslage von 1500 m, und der Führer hat die Absicht, die Nacht hindurch zu fahren. Erfahrungsgemäß dauert die Ballastausgabe die ersten Nachtstunden hindurch an, bis durch die Wärmeausstrahlung der Hülle das Gas sich auf seine tiefste Temperatur abgekühlt hat. Im Laufe des Tages liege die Temperatur der Füllung 25° über der Lufttemperatur, nachts sinkt sie 5° unter dieselbe, so daß wir mit einem $\Delta t = 30°$ zu rechnen haben.

(Die Lufttemperatur geht somit in unsere Rechnung nicht ein; Änderungen der gemeinsamen Temperaturen von Gas und Luft sind ohne Einfluß auf den Ballon konstanten Gasgewichtes). Will der Führer den Ballon durch Ballastausgabe in seiner Höhe von 1500 m halten, so müßte er in Summa $30 \cdot 5{,}66 = 170$ kg Ballast opfern. Allein er würde dann einen schlaffen Ballon führen, den in Wirklichkeit die geringste Steigkraft, das geringste Überwerfen in seine Prallhöhe hinaufführt. Da Volumverminderung durch Abkühlung um 1^0 stets kompensiert wird durch Höhersteigen um 30 m, steigt der Pettenkofer allmählich an auf $1500 + 30 \cdot 30 = 2400$ m. Nach diesem Normalschema, Ausgleich der Temperaturschwankung durch Ballastabgabe an Ort und Stelle und gleichzeitiges, keine eigentlichen Ballastopfer forderndes Heben des Ballones auf seine neue Prallhöhe, wird aber nur in Ausnahmefällen verfahren werden. Der Führer wird sich vielmehr eine Temperaturschichtung der Atmosphäre, die sich häufig bei Nacht, namentlich bei ruhiger Wetterlage, einstellt, zunutze machen. In verschiedenen Schichten der Atmosphäre kann der Gehalt an Staub und organischen Partikeln stark und sprungweise sich ändern. Die kleinen, festen Teilchen strahlen Wärme aus und kühlen so die zu Austrahlung weit weniger befähigten Luftschichten, in denen sie schwimmen, ab, um so mehr, je zahlreicher sie vorhanden. Namentlich die der Erde auflagernden, besonders stark verunreinigten Schichten kühlen sich durch diese Ausstrahlung so stark und schnell ab, daß bald nach Sonnenuntergang sich kalte Bodenschichten (sogenannte Temperaturumkehr) einstellen, die mit steigender Sonne wieder verschwinden. Nach klaren, windstillen Sommertagen ist mit Sicherheit auf diese Schichten zu rechnen. In Perioden windstillen Frostwetters bilden sich durch einen andern, hier nicht näher auseinanderzusetzenden Mechanismus kalte Bodenschichten aus, die bei Tag eben so wohl vorhanden sind, wie bei Nacht. Diese kalten Schichten macht sich der Führer, oft wohl unbewußt, zunutze. Der sinkende, auf eine kältere Schicht fallende Ballon beginnt auf dieser zu schwimmen. Ist diese um Δt^0 kälter wie die darüber liegende Schicht, so wird die Temperaturdifferenz zwischen Gas und Luft nun Δt^0. Zur Anwendung kommt Temperaturgesetz 4; das Gewicht der verdrängten Luft ist gegeben durch Ballonvolumen und die Maximalhöhe, die er erreicht hatte; es können somit die Zahlen der kleinen Tabelle S. 62 benutzt werden. Trifft z. B. der aus 2000 m Maximalhöhe niedergehende 1440 cbm-Ballon in irgend einer Höhe eine Schicht mit 5^0 niedrigerer Temperatur, so vermindert sich seine Sinkkraft um $5 \cdot 5{,}32 = 27$ kg; war sie vorher geringer, so schwimmt der Ballon. Trifft der Ballon, nachdem er in den ersten Abendstunden durch Ausstrahlung den größten Teil seines

Temperaturüberschusses eingebüßt hat, auf eine solche Schicht, so kann er mit minimalem Ballastverbrauch Stunden hindurch auf derselbe schwimmend erhalten werden. Die überwiegende Mehrzahl der Nachtfahrten pflegt nach diesem Schema zu verlaufen. Gibt die aufsteigende Sonne in den Morgenstunden dem Gase wieder die tags vorher innegehabte Temperatur, so war die ganze Ballastabgabe bei Nacht nur ein großes, notgedrungenes Überwerfen. Die weitere Fahrkurve und Fahrthöhe verläuft so, als wäre die gesamte Ballastausgabe in der am Vortage erreichten Maximalhöhe vor sich gegangen; die nächtliche Episode ist für die Weiterfahrt irrelevant; sie hat nur dazu gedient, den Ballon hoch zu treiben und die Fahrdauer dadurch abzukürzen. Soll diese Verkürzung möglichst gering werden, so hat man dies Überwerfen, die nächtliche Ballastabgabe, möglichst klein zu machen; man wird deshalb zu später Stunde mit schon kühlem Ballon die Fahrt antreten.

Würde man eine Nachtfahrt nach dem an erster Stelle erläuterten Schema verlaufen lassen, so würde man durch Messung der Lufttemperaturen bei genauer Ballastkontrolle überaus wichtige Schlüsse ziehen können auf den Unterschied der Gastemperaturen bei Tag und Nacht. Dabei müßte man sich aber vergewissern, daß am Ballon keine Taubildung eintritt; denn durch Ausstrahlung bei klarem Himmel kann sich derselbe leicht unter den Sättigungspunkt der umgebenden Luft abkühlen und sich mit Feuchtigkeit beschlagen. Bei Fahrt in feuchter Luft und klarem Himmel können beträchtliche Mengen Wasserdampf kondensiert werden; daß förmlicher Regen von der Hülle und dem Korb niederging, ist schon mehrmals beobachtet worden.

Beispiel 43. Sehr schön lassen sich die auseinandergesetzten Verhältnisse erläutern bei eingehender Betrachtung der Barographenkurve des Ballons Helvetia (Führer Oberst Schäck) während der Gordon Bennet-Fahrt 1908. (Ill. Aer. Mitt. 1908, S. 732.) In der Nacht vom 11.—12. Okt. hielt sich der Ballon durchschnittlich in 250 m Höhe, um vormittags 10 Uhr des 12. Okt. 2200 m, die Maximalhöhe dieses Tages, zu erreichen. Die Fahrt in der Nacht vom 12.—13. Okt. vollzieht sich in 100—200 m Höhe, um sich mit aufgehender Sonne bis 11 Uhr vormittags des 13. Okt. auf 3400 m zu heben. Die Fahrt in die Nacht hinein erzwang eine Ballastabgabe, die sich am andern Morgen als ein Überwerfen kennzeichnet, das eine Erhöhung der Fahrkurve um 1200 m bewirkte. Und am Morgen 9 Uhr des 14. Okt. hebt sich die nächtliche Fahrthöhe von 250—1000 m auf 4500 m; die Nachtfahrt hat wiederum ein Überwerfen entsprechend 1100 m erzwungen.

§ 15. Rekapitulation.

1. Gleiche Volumina Wasserstoff und Leuchtgas können in gleicher Höhe im Verhältnis 12 : 7 belastet werden (allgemein im Verhältnis der Normaltragkräfte). Ein Wasserstoffballon kann im gleichen Niveau 70% mehr Gesamtlast tragen wie ein gleich großer Leuchtgasballon.

2. Die Normalhöhe eines Wasserstoffballones ist stets 4300 m höher wie diejenige des gleichgroßen und gleichbelasteten Leuchtgasballones. (Allgemein ist diese Höhendifferenz bestimmt durch eine Höhenzahl gleich dem Verhältnis der Normaltragkräfte.)

3. Der Wasserstoffballon und der Leuchtgasballon gehorchen demselben *Ballastwirkungsgesetze:* Die Normalhöhe steigt um 80 m, so oft die Gesamtbelastung um 1% ihres Wertes abnimmt.

4. *Zweite Form des Ballastwirkungsgesetzes:* Schwebt ein Ballon in einer Gleichgewichtslage, so verhalten sich die Gewichte der Gasfüllung und Belastung bei Wasserstoff wie 1 : 13,48, bei Leuchtgas wie 1 : 1,19. Werden g Kilogramm Ballast abgeworfen, so steigt der Ballon so hoch, daß $\frac{g}{13{,}48} = g \cdot 0{,}074$ kg Wasserstoff, resp. $\frac{g}{1{,}19} = g \cdot 0{,}839$ kg Leuchtgas dem Füllansatz entweichen.

5. Temperaturgesetz 2. Die Änderung der Gas und tragenden Luftschicht *gemeinsamen* Temperatur wirkt *gleich* auf den Wasserstoff- und Leuchtgasballon *konstanten Volumens*. Ist diese gemeinsame Temperatur $\pm t^0$, so ändert sich für beide a) in ungeänderter Höhe die Tragkraft um $\mp t \cdot 4‰$ ihres Wertes, b) bei ungeänderter Belastung ihre Höhe um $\mp t \cdot 30$ m.

6. Temperaturgesetz 3. Temperaturunterschiede zwischen Gas und tragender Luftschicht wirken auf einen Ballon konstanten Volumens mit Leuchtgasfüllung 11 mal stärker wie mit Wasserstoffgasfüllung. Ist die Füllung auf einer $\pm \Delta t^0$ höheren Temperatur, so ändert sich

a) in ungeänderter Höhe die Tragkraft um

$\pm 0{,}00307 \cdot \Delta t$ ihres Wertes bei Leuchtgasfüllung,
$\pm 0{,}00027 \cdot \Delta t$ ihres Wertes bei Wasserstoffüllung.

b) bei ungeänderter Belastung die Höhe um

$\pm 24{,}6 \Delta t$ Meter beim Leuchtgasballon,
$\pm 2{,}17 \Delta t$ Meter beim Wasserstoffballon.

7. Temperaturgesetz 1. Ändern sich die Temperaturen von Gas und tragender Luftschicht derart, daß ihre Differenz kon-

stant bleibt, so ist diese Änderung auf einen Ballon *konstanten Gasgewichtes ohne Einfluß*.

8. Temperaturgesetz 4. Ändert sich die Temperaturdifferenz zwischen Gas und Luft um $\pm \Delta t^0$, so ändert sich die Tragkraft des Ballones *konstanten Gasgewichtes, unabhängig von der Art der Füllung*, um $\pm \Delta t \cdot 4\permil$ des Gewichtes der verdrängten Luft.

9. Die Wirkung vermehrter oder verminderter Einstrahlung auf einen prall in einer Gleichgewichtslage schwebenden Ballon ist, abgesehen von Vorzeichen, gänzlich verschieden. Vermehrte Einstrahlung wirkt beim Leuchtgasballon 11 mal stärker in bezug auf Tragkraft (oder Höhe) wie beim Wasserstoffballon; verminderte Einstrahlung kommt bei beiden Ballonen gleich und in außerordentlich stärkerem Grade zur Wirkung. Die Abnahme der Tragkraft durch Verminderung der Gastemperatur ist beim Leuchtgasballon *2,2* mal, beim Wasserstoffballon 14,5 mal größer wie ihre Zunahme bei Temperatursteigerung um denselben Betrag.

10. Soll die Wirkung der Sonnenstrahlung auf Steigerung der Tragkraft oder Höhe ausgenutzt werden, so ist der Leuchtgasballon dem Wasserstoffballon außerordentlich überlegen. Andererseits ist in fahrtechnischer Beziehung letzterer vorzuziehen; auf gleiches Überwerfen reagiert er 70% weniger; dementsprechend hebt sich die Fahrkurve langsamer, ist der Ballastverbrauch (relativ zur Gesamtlast) geringer und steigert sich die Fahrtdauer.

§ 16. Die Landung.

Jeder aus einer Gleichgewichtslage niedergehende Ballon ist von konstantem Gasgewicht. Die Theorie der Landung ist zum Teil enthalten in der Lehre vom Ballon konstanten Gasgewichtes, die wir im wesentlichen schon in § 14 erledigt haben. Ihre Hauptaufgabe ist, die Ballastmenge zu bestimmen, die zu einer sicheren Landung dem Führer zur Verfügung stehen muß. Mit diesem Teil des Landungsproblems werden wir uns in diesem Paragraphen befassen.

Eine glatte Landung wird in der Regel so verlaufen, daß der Führer den sinkenden Ballon nahe der Erdoberfläche abfängt, d. h. durch Ballastausgabe in eine Gleichgewichtslage überführt oder doch die Fallgeschwindigkeit auf einen hinreichend kleinen Wert herabsetzt, und dann die schließliche Landung vollzieht. Die zum Abfangen nötige Ballastmenge, die in Form von Ballast oder Schlepptau zur Ausgabe gelangt, nennen wir den *Bremsballast*, den weiterhin zur endgültigen Landung nötigen Ballast den *Landungsballast*. Diese letztere Ballastmenge ist theoretisch nicht zu bestimmen; Geländeformation, Telegraphen- und

Hochspannungsleitungen, Nähe von Gebäuden und Ortschaften, mangelnde Windgeschwindigkeit, Kostbarkeit und Zerbrechlichkeit mitgeführter Apparate sind in erster Linie die Gesichtspunkte, nach denen der erfahrene, überlegende Führer diese Ballastmenge sich reserviert, stets eingedenk, *daß zu viel niemals schadet, zu wenig verhängnisvoll werden kann.*

Den Bremsballast setzen wir gleich der Menge Ballast, die auszugeben ist, um die Sinkkraft des niedergehenden Ballones aufzuheben. Im luftleeren Raum würde der Fall dann ohne Beschleunigung, mit unverminderter Geschwindigkeit sich fortsetzen; in Wirklichkeit wird der Luftwiderstand die Geschwindigkeit auf nicht mehr in Betracht kommende Werte, etwa $\frac{1}{20}$ ihres Wertes, herabgedrückt haben, falls der Ballon eine etwa 3 seiner Durchmesser gleiche Strecke durchlaufen hat; das sich niederlegende Schlepptau wird nach einer noch kürzeren Strecke den Fall *völlig* aufgehoben haben.

Würden während des Niedergangs eines Ballones Gas und Atmosphäre auf konstanter Temperatur sein, oder würden die Temperaturen beider sich nur so ändern, daß ihre Differenz konstant bliebe, so wäre das Landungsproblem einfach erledigt. Denn unter diesen Bedingungen bliebe die Sinkkraft des Ballones, da er von konstantem Gasgewicht ist, konstant. Würde der Ballon in der Höhe eine Sinkkraft im Betrage von n Kilogramm erhalten haben, etwa durch Tau, Regen oder Schnee, oder durch Ventilzug, oder durch einen Wolkenschatten, so würde eine Ballastabgabe von n Kilogramm, an beliebiger Stelle ausgegeben, denselben abfangen; das geringste Zuwenig würde nicht genügen, das geringste Zuviel ihn wieder mindestens bis zur Ausgangslage emporbringen. Einzig und allein die Notwendigkeit, die Veränderungen der Temperaturen mit berücksichtigen zu müssen, erfordert etwas mehr Überlegung und hat, trotz der Einfachheit der Lösung, zu mannigfachen Irrtümern und Unklarheiten Veranlassung gegeben.

Vor allem ist klar, daß, da es sich um den Einfluß der Temperaturen auf einen Ballon konstanten Gasgewichtes handelt, die Art der Füllung ohne Einfluß ist (Temperaturgesetz 4; § 15; 8). *Gleiche Temperaturänderungen vorausgesetzt brauchen gleichgroße Ballone aus gleicher Höhe niedergehend gleiche Mengen Bremsballast, unabhängig von der Natur der Füllung. Unter gleichen Bedingungen erfordert derselbe Ballon mit Leuchtgas und mit Wasserstoffüllung dieselbe Menge Bremsballast.*

Weiter ist klar, daß, da das Temperaturgesetz 4 gilt, alle Temperaturwirkungen proportional sind dem Gewicht der verdrängten Luft. Dies Gewicht ist aber während des ganzen

Niedergangs konstant[1]) und nur bedingt durch die (maximale) Höhe, aus welcher der Ballon niedergeht; je größer die Höhe, desto geringer dies Gewicht. Daraus folgt:

Gleiche Temperaturänderungen vorausgesetzt braucht derselbe Ballon um so weniger Bremsballast, aus je größerer Maximalhöhe er zur Landung niedergeht. Und für den Führer folgt die goldene Regel: *Je geringere Höhen der Ballon erreicht hat, desto vorsichtiger sei die zur Landung reservierte Ballastmenge bemessen.*

Die bereits mit $\alpha = 4\,^0/_{00}$ multiplizierten Gewichte der verdrängten Luft entnimmt man der Tabelle der verdrängten Luftgewichte Seite 62; aus dem Volumen 1000 cbm kann leicht für andere Ballongrößen umgerechnet werden; für zwischenliegende Höhen wird interpoliert, für größere Höhen werden die zur Höhe Null gehörigen Werte durch die Höhenzahl der betreffenden Höhe dividiert. Die Lufttemperatur in diesen Höhen ist dabei mit genügender Genauigkeit zu 0^0 angenommen. Um vollständige Genauigkeit zu erreichen, müßte das Gas vom Volumen des prallen Ballones von seiner Temperatur auf die Temperatur 0^0 gebracht werden, und das Luftgewicht dieses korrigierten Volumens genommen werden, das nun unabhängig ist von jeder Gas und Luft gemeinsamen Temperatur. In diesem meistens kleineren Ballon haben wir dann einen Ballon konstanten Gasgewichtes vor uns, der sich durch Erhöhung der Gastemperatur umwandelt in den prallen Ballon, von dem wir ausgingen. Auch wenn wir mit Hilfe der Formeln 25 oder 25a rechnen oder unsere Tafeln benützen, ist zur vollständigen Genauigkeit diese Korrektion vorzunehmen, wie in Beispiel 44 gezeigt werden wird. Für alle Fälle der Praxis genügen aber die Zahlen der Tabelle, so wie sie vorliegen.

Das Gewicht dieser verdrängten Luft $V\rho = \frac{Q}{s}$ (vgl. § 15) bezeichen wir zur Abkürzung mit L. Dann ist die Tragkraft dieser Gasmasse $L(1 - s)$, gleiche Temperatur in Gas und Luft vorausgesetzt. Erhält das Gas eine Temperaturdifferenz Δt gegen die Luft, so wird (Formel 24) dessen Tragkraft auf $L(1 - s) + \alpha\Delta t \cdot L$ abgeändert. Unterscheiden wir durch $\overline{\Delta t}$ und $\underline{\Delta t}$ die Tragkraft in der Höhe und in der Tiefe, so erhalten wir

$$\text{Tragkraft in der Höhe} = L(1 - s) + \alpha\overline{\Delta t} \cdot L,$$
$$\text{Tragkraft in der Tiefe} = L(1 - s) + \alpha\underline{\Delta t} \cdot L.$$

[1]) Wir rechnen jetzt immer mit der Differenz Gastemperatur — Lufttemperatur; ist diese Differenz konstant, so ist das Gewicht der verdrängten Luft unabhängig von der Temperatur.

Bezeichnen wir den Überschuß an Tragkraft in der Höhe mit $\mathfrak{g}$, so haben wir

26) $\mathfrak{g} = \alpha L \cdot \overline{\Delta t} - \alpha L \cdot \underline{\Delta t} = \alpha L (\overline{\Delta t} - \underline{\Delta t})$ Kilogramm,

worin, wie erläutert, αL der Tabelle S. 62 entnommen werden kann. (Ist $\underline{\Delta t}$ größer wie $\overline{\Delta t}$, so ist $\mathfrak{g}$ selbstverständlich negativ zu nehmen.)

Ist die Sinkkraft in der Höhe $\mathfrak{g}_1$ Kilogramm, so hat sie sich beim Niedersinken des Ballones in der Tiefe auf $\mathfrak{g}_1 + \mathfrak{g}$ Kilogramm vergrößert. Um den Ballon hier abzufangen, müssen $\mathfrak{g}_1 + \mathfrak{g}$ Kilogramm Ballast ausgeworfen werden; dies ist somit der erforderliche Bremsballast. Der Anteil $\mathfrak{g}_1$, der während des Niedersinkens konstant bleibt, ist selbstverständlich weiterer theoretischer Behandlung nicht zugänglich; er ist gegeben durch die Beschwerung durch Tau, Regen, Schnee oder Ventilziehen. Tritt, wie es meistens der Fall ist, das Sinken des Ballones von selbst ein, etwa durch geringe Abnahme der Einstrahlung oder Vermehrung der Ausstrahlung, so kann $\mathfrak{g}_1$ gleich Null angenommen werden.

Der Wert von $\mathfrak{g}$ ist bedingt durch vier Temperaturen, die Temperaturen von Gas und Luft oben und unten. Die Verteilung der Temperatur in der Athmosphäre kann während des Aufstieges festgestellt werden; findet die Landung nicht nach zu langer Zeit oder zu weit vom Aufstiegsorte statt, so werden sich, lokale Verhältnisse oder Witterungsumschlag ausgenommen, diese Temperaturen wenig geändert haben. Im allgemeinen nimmt die Lufttemperatur nach oben ab, in einem Grade, der durch die Wetterlage bedingt ist; dem meteorologisch geschulten Führer wird zu ihrer Beurteilung die Wetterkarte die wichtigsten Anhaltspunkte geben. Durchschnittlich kann man in den untersten drei Kilometern mit einem Temperaturgefälle von $0{,}5^0$ auf 100 m Erhebung rechnen, das dann mit der Höhe langsam zunimmt und in Höhen von 6—7 km auf $0{,}7^0$ pro 100 m gestiegen ist. Doch wird in einer Reihe warmer Sommertage bei ruhiger Wetterlage dieses Temperaturgefälle namentlich in den unteren Schichten sich rasch vergrößern und bis 1^0 auf 100 m und darüber zunehmen. Daß unmittelbar der Erdoberfläche auflagernd im Sommer unverhältnismäßig warme, im Winter äußerst kalte Schichten vorhanden sein können, ist wohl zu beachten.

Die Gastemperaturen werden durch zwei gänzlich voneinander verschiedene Faktoren bedingt. Der erste derselben sind die Strahlungsverhältnisse. Im allgemeinen nimmt bei gleichem Sonnenstande die Intensität der Einstrahlung mit der Höhe zu.

Aus diesem Grunde wird Δt etwas kleiner wie $\overline{\Delta t}$ werden. In Ausnahmsfällen kann aber das Entgegengesetzte stattfinden, etwa wenn der Niedergang des Ballones bei bedecktem Himmel beginnt und sich weiterhin die Wolkendecke öffnet.

Der zweite Faktor sucht umgekehrt Δt gegenüber $\overline{\Delta t}$ außerordentlich zu vergrößern. Bekanntlich kühlen sich alle Gase bei Ausdehnung ab und werden durch Kompression erwärmt. (Pneumatisches Feuerzeug, Föhn.) Wird atmosphärische Luft von 0^0 von Barometerstand 380 mm (entsprechend einer Normalhöhe von 5540 m) bis zum Drucke 760 mm komprimiert (ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung zur Erde heruntergebracht), so steigt ihre Temperatur auf $59{,}8^0$ an. Diese Temperaturschwankung läßt sich leicht berechnen, wenn eine Größe, das Verhältnis der Wärmekapazitäten des Gases, bekannt ist. Für Wasserstoff und atmosphärische Luft ist dies gleich $\frac{7}{5}$; für Leuchtgas ergibt sich nach seiner Zusammensetzung ein wenig geänderter Wert, so daß wir mit genügender Genauigkeit ebenfalls $\frac{7}{5}$ annehmen. Ist der Höhenunterschied zweier Orte durch eine Höhenzahl n bestimmt, so langt, wie die mechanische Wärmetheorie lehrt, eine von der oberen Station mit der Temperatur $t_0{}^0$ abgehende Ballonfüllung in der tiefen Station an mit einer Temperatur

$$t^0 = (273 + t_0{}^0)\, n^{\frac{1}{3{,}5}} - 273.$$

Die Rechnung ergibt, daß beim Durchschreiten kleiner Strecken die Temperaturzunahme 1^0 auf 100 m Niedergang beträgt und sich mit der durchlaufenen Strecke etwas steigert, so daß sie bei einem Niedergang um 5—6 km auf etwa $1{,}1^0$ pro 100 m angewachsen ist. Mit hinreichender Genauigkeit läßt sich deshalb der Satz aussprechen: *Die Füllung eines Ballones ändert ihre Temperatur immer um* $\pm 1^0$, *so oft derselbe um 100 m ab- resp. aufsteigt.*[1]) *Dabei ist selbstverständlich Voraussetzung, daß aus keinerlei äußeren Quellen derselben Wärme zu- oder abgeführt wird.* Letzere Bedingung ist in Wirklichkeit, selbst bei konstanten Strahlungsverhältnissen, niemals erfüllt. Der wärmer werdende Ballon durchfällt meistens kühlere Luftschichten, die an der Hülle vorbeistreichende Luft kühlt die Hülle kräftig ab; der fallende Ballon verhält sich wie ein aspiriertes Thermometer. Die kühle Hülle erniedrigt die Temperatur der anliegenden

[1]) Eine *konstante* Temperaturänderung von nahezu 1^0 auf 100 m würde sich ergeben, falls die Temperatur der durchfallenen atmosphärischen Schichten stets mit der sich ändernden Gastemperatur übereinstimmt.

Gasschichten, und die sich ausbildenden Strömungen setzen die Temperatur der Füllung gleichmäßig herunter. In Wirklichkeit beträgt die Temperaturänderung ungleich weniger wie 1^0 auf 100 m; würde diese Temperaturänderung *ungeschwächt* eintreten, so könnte unter *normalen* atmosphärischen Verhältnissen, wie sich zeigen wird, ein geschlossener, ausdehnbarer Gummiballon (Ballon sonde) sehr bald nicht weiter steigen und ein Freiballon aus einer Gleichgewichtslage ohne Ventilhilfe nicht zur Landung gebracht worden.

Wie nun diese verschiedenen Faktoren ineinandergreifen, verfolgen wir am besten an Hand eines Diagramms.

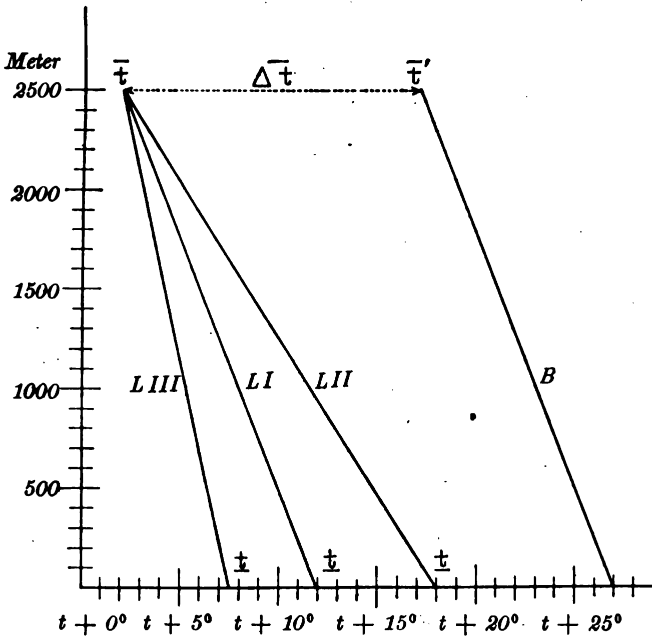


Fig. 2.

Wir tragen horizontal die Temperaturen auf, vertikal die Höhen und richten den Maßstab so ein, daß 1^0 dieselbe Länge erhält wie 100 m Höhe. Eine Temperaturabnahme von 1^0 auf je 100 m Höhenzunahme wird dann angezeigt durch eine Gerade, die unter 45^0 von rechts unten nach links oben verläuft; je geringer das Temperaturgefälle, desto steiler steht die Gerade, die dasselbe zur Darstellung bringt. Die Gastemperaturen in der Höhe und Tiefe bezeichnen wir mit t' und $\underline{t}'$, die Lufttemperaturen

entsprechend mit $\bar{t}$ und $\underline{t}$. In einer Höhe von 2500 m nehmen wir den Ballon mit einer Gastemperatur von $\bar{t}'$ im Gleichgewicht schwebend an und erteilen ihm eine Kleinigkeit Sinkkraft ($\mathfrak{g}'$ praktisch = 0 gesetzt); die Temperatur des Gases steige gleichmäßig an, wir nehmen an $0{,}4^0$ pro 100 m, so daß wir den Temperaturgang dargestellt erhalten durch die Gerade *B*. Die Lufttemperatur in der Höhe 2500 m, $\bar{t}$, sei 15^0 tiefer und steige ebenfalls proportional mit der Tiefe, so daß wir ihre Verteilung ebenfalls durch eine Gerade *L* darstellen können. Wir haben nun drei verschiedene Fälle zu unterscheiden.

1. Fall. Die Gerade *LI* ist parallel *B*, die Temperaturdifferenz Δt bleibt konstant, $\overline{\Delta t} = \underline{\Delta t}$. Die Sinkkraft hat sich nicht geändert, dementsprechend gibt Formel 26) $\mathfrak{g} = 0$. Ist der Ballon durch eine äußerst geringe Sinkkraft $\mathfrak{g}_1$ zum Fall gebracht worden, so bleibt sie während des ganzen Niedergangs konstant; der Ballon fällt mit konstanter, äußerst geringer Geschwindigkeit und kann mit einer minimalen Ballastabgabe $\mathfrak{g}_1$ Kilogramm abgefangen werden. Hat $\mathfrak{g}_1$ beliebig große Beträge, so haben wir entsprechend größere, konstant bleibende Fallgeschwindigkeit (vgl. § 17), doch kann durch eine Ballastmenge $\mathfrak{g}_1$ Kilogramm der Ballon abgefangen werden.

2. Fall. Die Temperatur der Atmosphäre steigt nach der Tiefe zu rascher an wie die Gastemperatur, die Gerade *LII* steht weniger steil wie *B*. Dann ist, wie auch ein Blick auf das Diagramm lehrt, $\underline{\Delta t}$ kleiner wie $\overline{\Delta t}$, der Ballon besitzt in der Tiefe weniger Tragkraft wie oben, das $\mathfrak{g}$ der Formel 26 erhält einen endlichen, positiven Wert. Die Sinkkraft, die den Fall des Ballons eingeleitet hat, wächst in dem Maße, wie beim Niedersinken Δt abnimmt, die Fallgeschwindigkeit steigert sich und die Menge Bremsballast ist um $\mathfrak{g}$ Kilogramm größer wie die Sinkkraft $\mathfrak{g}_1$, die den Fall eingeleitet hat.

3. Fall. Die Temperatur der Atmosphäre steigt nach der Tiefe zu langsamer an wie die Gastemperatur; die Gerade *LIII* steht steiler wie *B*. Dann ist $\underline{\Delta t}$ größer wie $\overline{\Delta t}$, der Ballon besitzt in der Tiefe mehr Tragkraft wie oben, das $\mathfrak{g}$ der Formel 26 wird negativ. Die Sinkkraft, die den Fall eingeleitet hat, und die Fallgeschwindigkeit nehmen ab und können bei kleinen Anfangswerten verschwinden. Nur durch wiederholtes Ventilziehen kann dann der Ballon herabbefördert werden. Hat ihn eine große, anfängliche Sinkkraft $\mathfrak{g}_1$ ganz herabgebracht, so ist zum Abfangen eine um $\mathfrak{g}$ Kilogramm geringere Ballastmenge erforderlich. Atmosphärische Schichten mit kleinem Temperaturgefälle pflegt man deshalb wohl auch „*gut tragende*“ oder „*stabile*“ Schichten zu nennen.

Da das Temperaturgefälle in der Atmosphäre in der Regel kleiner ist wie 1^0 auf 100 m, so würden wir, falls das Gas sich 1^0 auf 100 m erwärmen würde, in der Regel den Fall 3 vor uns haben. Das widerspricht aller Erfahrung; sie zeigt, daß wir in weit überwiegender Mehrzahl den Fall 2 antreffen. Daraus folgt, daß der Temperaturgradient des Gases kleiner ist wie der durchschnittliche Temperaturgradient der Atmosphäre, also kleiner wie $0,5^0$ auf 100 m.

Dieselben Überlegungen gelten auch für den Aufstieg. Im Fall 1 steigt der Ballon konstanten Gasgewichtes (Gummiballon) mit konstanter Steigkraft und konstanter Geschwindigkeit; im Fall 2 nehmen beide zu, im Fall 3 kann der Aufstieg zum Stillstand kommen.

In Wirklichkeit liegen bei dem häufig mit der Höhe wechselnden Temperaturgefälle der Atmosphäre die Verhältnisse oft so, daß der niedergehende Ballon die drei Fälle in wechselnder Reihenfolge vorfinden kann. Jeder Fall wirkt auf seine Weise, wobei für den Ablauf maßgebend ist, mit welcher Sinkkraft der Ballon in die neuen Verhältnisse eintritt. So kann der mit kleiner Sinkkraft in eine isotherme Schicht, die den Fall 3 ganz besonders ausgeprägt darstellt, eintretende Ballon zum Stillstande kommen, bis er seinen Überschuß von Temperatur durch Leitung an die Umgebung abgegeben hat. Daß die drei Fälle häufig in ihrer Intensität wechselnd oder sich gegenseitig ablösend vorkommen, zeigt die variable Sinkgeschwindigkeit, die so oft dem Barogramm entnommen werden kann. Auf die Schichten, die dem Erdboden unmittelbar aufliegen, hat der Führer besonders zu achten. An heißen, windstillen Sommertagen kann die rasche Temperaturzunahme in den letzten 100 m ganz abnorm hohe Ballastopfer erfordern, während an klaren, kalten Wintertagen der Ballon nur durch andauerndes Ventilziehen herunter zu bringen ist.

Diese Betrachtungen geben auch Aufschluß über die viel umstrittene Frage, ob ein Wolkenschatten besser sofort in der Höhe oder später in der Tiefe zu parieren ist. In Fall 2, der meist vorliegt, wächst die erforderliche Ballastmenge mit der Tiefe; in Fall 3 nimmt sie mit der Tiefe ab; dabei wächst die Möglichkeit, daß der Wolkenschatten vor Ballastausgabe verschwindet und ein Überwerfen vermieden wird. (Vgl. dazu unten § 19.)

Da jegliche Wärmezufuhr und- abfuhr, sowohl durch Leitung wie auch durch Strahlung, durch die Hülle hindurch erfolgt, diese aber mit dem Wachsen des Ballondurchmessers gegenüber seinem Inhalt immer mehr zurücktritt, so folgt, daß bei gleichen äußeren Bedingungen die Füllungen ihre Temperaturen um so langsamer ändern, je größer der Ballon. Der große Ballon ist

gegenüber äußeren Ursachen, die seine Temperatur zu ändern suchen, träger wie der kleine. Je größer ein sinkender Ballon, desto weniger Wärme fließt durch seine Hülle in die durchfallenen Luftschichten ab, desto mehr nähert sich die Temperaturzunahme des Gases dem Werte 1 auf 100 m, desto mehr kommt die Kompressionswärme dem Ballon zunutze und desto langsamer nimmt während des Falles die Sinkkraft zu. Mit der Größe des Ballons nimmt unter gleichen äußeren Bedingungen die Menge des nötigen Bremsballastes relativ ab. *Je kleiner der Ballon, desto vorsichtiger bemesse der Führer den zur Landung nötigen Ballast.*

Wir sehen aus dem Erläuterten, daß der wichtigste Teil des Landungsproblems, die Bestimmung der Bremsballastmenge, ein reines Temperaturproblem ist. Eine alle Ansprüche, die man an eine überlegte Führung stellen kann und darf, befriedigende Behandlung der Landung ist nur möglich, wenn sich der Führer durch Messungen während des Aufstieges von den Temperaturverhältnissen in der Atmosphäre unterrichtet hat.

Beispiel 44. Der Pettenkofer, Inhalt 1440 cbm, geht aus 3000 m Höhe zur Landung über, da ihm ein vor der Sonne vorüberziehender, dünner Cirrusschleier eine äußerst geringe Sinkkraft verleiht. Die Gastemperatur liege 30^0 über der Lufttemperatur; die Temperatur am Erdboden sei 20^0 und die Temperaturabnahme in der Atmosphäre $0{,}6^0$ auf 100 m. Wie viel Kilogramm Bremsballast hat der Führer auszugeben, unter der Voraussetzung, daß sich das Gas beim Niedergang pro 100 m um $0{,}3^0$ erwärmt?

Unter diesen Annahmen ergibt sich die Lufttemperatur $\bar{t}$ in 3000 m Höhe zu 2^0, die Gastemperatur $\bar{t}'$ zu 32^0.

1) Lösung mit Hilfe der Tabelle der verdrängten Luftgewichte S. 62. Wir entnehmen der Tabelle für das Luftgewicht, das ein 1440 cbm-Ballon in 3000 m verdrängt, bereits mit α multipliziert, den Wert 4,69 kg. Dieser Wert ist hinreichend genau. Um vollständige Genauigkeit zu erhalten, haben wir das Gasvolumen 1440 cbm von 32^0 auf 0^0 zu bringen, was 1290 cbm ergiebt. Ein schlaffer Ballon von 1440 cbm, bei 0^0 gemeinsamer Temperatur mit 1290 cbm Gas gefüllt, würde dann mit einer Gastemperatur von 32^0 in Luft von 2^0 versetzt genau der Ballon sein, den wir vor uns haben. An Stelle von 4,69 kg erhalten wir genau $\alpha \cdot 1290 = 4{,}20$ kg. So oft der Ballon um 100 m sinkt, verkleinert sich die Temperaturdifferenz Gas — Luft um $0{,}3^0$; während des ganzen Niedergangs somit um 9^0.

$(\bar{t} = 2^0,\ \underline{t} = 20^0;\ \bar{t}' = 32^0,\ \underline{t}' = 41^0,\ \overline{\Delta t} = 30^0,\ \underline{\Delta t} = 21^0)$.

Der Bremsballast berechnet sich demnach zu $9 \cdot 4{,}69 = 42$ kg;

oder genau $9 \cdot 4{,}2 = 38$ kg; der Unterschied kommt nicht in Betracht.

2) Lösung mit Hilfe der Formel 25a. Um volle Genauigkeit zu erreichen, müssen wir das G berechnen desjenigen schlaffen Ballones, aus welchem der vorliegende Ballon hervorgeht, wenn wir das Gas um $\Delta t = 30^0$ über die Luft erwärmen; dieser Ballon ändert dann, indem wir ihn auf die gemeinsame Temperatur 0^0 bringen, sein G nicht: Wir können somit die 1440 cbm von 32^0 direkt auf 0^0 bringen und erhalten 1290 cbm. Bei Leuchtgasfüllung ergibt sich dann für diesen nach bekanntem Verfahren in 3000 m eine Tragkraft $G = 627$ kg; und Formel 25a liefert den Bremsballast $\mathfrak{g} = 0{,}0067 \cdot 9 \cdot 627 = 38$ kg. Mit genügender Genauigkeit können wir aber für G die Normaltragkraft des 1440 cbm-Ballones in 3000 m $G = 695$ kg ansetzen und erhalten so $\mathfrak{g} = 42$ kg.

Bei Wasserstoffüllung würden wir für das G des 1290, resp. 1440 cbm-Ballones 1060, resp. 1190 kg erhalten haben und mit Formel 25a für g 38, resp. 42 kg, also dieselben Werte, da ja die Natur der Füllung ohne Einfluß ist.

3) Lösung mit Hilfe der Tafeln. Da die Natur der Füllung ohne Einfluß ist, ist es gleichgültig, auf welcher Tafel wir operieren. Wählen wir diejenige für den Leuchtgasballon, so finden wir für 1440 cbm in 3000 m Höhe die Normaltragkraft 695 kg. Verfolgen wir (siehe § 14) eine strichpunktierte, durch diesen Punkt gelegte Temperaturrichtungslinie 9^0 hindurch nach links oben, so werden wir zu einem 42 kg kleinerem Werte von G geführt; daraus folgt $\mathfrak{g} = 42$ kg. Wollen wir genauer operieren, so untersuchen wir, wie sich die 695 kg Tragkraft ändern, wenn wir die Gastemperatur um 30^0 heruntersetzen. Dazu verfolgen wir eine durch $G = 695$ gelegte, gestrichelte Temperaturrichtungslinie 30^0 hindurch nach links oben und werden so zu $G = 630$ geführt. Die durch diesen Punkt gelegte, strichpunktierte Richtungslinie 9^0 hindurch nach links oben verfolgt führt zu einem $\mathfrak{g} = 38$ kg kleinerem Werte von G.

Die berechneten Mengen Bremsballast, die auch in Form von Schlepptau zur Ausgabe gelangen können, erscheinen, namentlich für sommerliche Verhältnisse, etwas klein. Möglicherweise ist die Erwärmung des Ballongases etwas geringer wie $0{,}3^0$ auf 100 m; bei nur $0{,}2^0$ würden sich dieselben um 14, resp. 12 kg erhöhen. Andererseits kann, da der Ballon ein äußerst empfindliches Strahlungsthermometer darstellt, die in der Tiefe verminderte Sonnenstrahlung sich bemerkbar machen. Würde dadurch die Temperaturdifferenz Gas — Luft um 5^0 herabgesetzt, so würden 23, resp. 21 kg mehr auszugeben sein.

Würde die Landung durch kräftiges Ventilziehen, wobei der Ballon $\mathfrak{g}_1$ Kilogramm an Tragkraft verliert, eingeleitet worden sein, so würden sich die eben berechneten Ballastmengen um $\mathfrak{g}_1$ Kilogramm vergrößern.

Beispiel 45. An einem warmen Sommertage einer längeren Schönwetterperiode lande der Pettenkofer nachmittags aus nur 1000 m Maximalhöhe, wobei sich das Gas um 0,3 auf 100 m Fall erwärmen soll. Der Temperaturgradient der Atmosphäre betrage 1^0 auf 100 m. Eine heiße Bodenschicht von geringer Mächtigkeit soll sich im Laufe des Tages noch um 3^0 mehr erwärmen, als diesem Gefälle nach der Tiefe zu entspricht. Wieviel Bremsballast ist erforderlich? — Die Temperaturdifferenz $\overline{\Delta t}$ hat sich bei der Landung um 10^0 vermindert. Mit Hilfe der Tabelle finden wir den Bremsballast zu $10 \cdot 6 = 60$ kg. Nun können lokal die Bodenschichten sich leicht um 5^0 erwärmen, der Ballon beim Eintauchen in die unteren, staubhaltigen Schichten der Atmosphäre durch Verminderung der Strahlung 3^0 an Temperaturüberschuß einbüßen. Der Bremsballast steigt dann auf 90 kg an. Bei der Landung an heißen, windstillen Sommertagen muß deshalb der Führer mit Bemessung der zur Landung aufgesparten Ballastmenge mit größter Vorsicht verfahren.

Beispiel 46. Ein Ballon geht an einem klaren Wintertage aus 3200 m zur Landung nieder. Das Temperaturgefälle in der Atmosphäre betrage von 200 m Höhe an aufwärts $0{,}5^0$ auf 100 m, vom Erdboden bis 200 m Höhe liege eine isotherme, kalte Bodenschicht. Die Landung werde durch eine äußerst kleine Sinkkraft eingeleitet, die Erwärmung des Ballongases zu $0{,}3^0$ auf 100 m angenommen. Wie kalt muß die Bodenschicht sein, damit der in dieselbe eintauchende Ballon gerade abgefangen wird?

Unter den angenommenen Bedingungen hat sich die Temperaturdifferenz Gas — Luft beim Auftreffen auf diese kalte Schicht gegen oben um $30 \cdot 0{,}2 = 6^0$ verkleinert. Sinkt nun in dieser Schicht die Lufttemperatur sprungweise um 6^0, so ist diese Differenz ausgeglichen und der Ballon abgefangen. Betrug in 3200 m Höhe die Lufttemperatur -9^0, so ist dieselbe in 200 m $+6^0$; eine isotherme Bodenschicht von 0^0 würde also den Ballon abfangen. Wäre die Temperatur derselben -5^0, so müßten wir durch Ventilzug dem Ballon eine Sinkkraft geben, um ganz herab zu kommen. Diese ist selbstverständlich abhängig von der Ballongröße und der vorher erreichten Maximalhöhe. Für den 1440 cbm-Ballon finden wir im vorliegenden Falle mit Hilfe der Tabelle S. 62, daß dieselbe $5 \cdot 4{,}6$ kg $= 23$ kg betragen muß. Wir müßten also etwa $\frac{23}{0{,}7} = 30$ cbm Leuchtgas oder $\frac{23}{1{,}2} = 20$ cbm Wasserstoff ausströmen lassen.

Diese Beispiele erweisen zur Genüge den oben aufgestellten Satz, daß das Landungsproblem in erster Linie ein Temperaturproblem ist. Die maßgebenden Größen, die Temperaturen, entziehen sich einer genaueren Kenntnis und sind im Einzelfalle nur schätzungsweise anzunehmen. Da aber die Bestimmung der Bremsballastmenge das weitaus wichtigste Problem der Ballonführung ist, sollte kein Mittel unbenützt gelassen werden, dieselbe festzustellen. Wie man während des Niederganges selbst letztere annähernd bestimmen kann, soll im nächsten Paragraph gezeigt werden.

§ 17. Steigen und Fallen; Schwingungen eines Ballones.

Den Kräften, welche einen Ballon zum Steigen oder Sinken bringen, wirkt der Luftwiderstand entgegen. Wir setzen denselben an

$$W = \frac{1}{3} \cdot k \cdot \frac{\rho}{g} \cdot F \cdot v^2 \text{ Kilogramm:}$$

worin ρ die Luftdichte, g die Beschleunigung der Erdschwere $= 9{,}8$ m/sek.^{2}, F den Querschnitt des Ballones senkrecht zur Bergungsrichtung und v die Geschwindigkeit in Meter zur Sekunde bedeutet. Der Kugelform des Ballones ist durch den Faktor $\frac{1}{3}$ Rechung getragen; k nehmen wir zu 0,7 an, womit sich der Luftwiderstand einer Fläche von 1 qm, die sich mit der Geschwindigkeit von 1 m/sek. durch die Luft von Normaldichte bewegt, zu 90 g ergibt. Da wir im folgenden nur einige Fragen im Prinzip erläutern, nicht exakte Zahlenwerte erhalten wollen, sehen wir ab von Temperaturänderungen und nehmen Gas und Atmosphäre stets auf die Temperatur 0° an. Dann nimmt die Luftdichte ρ mit der Höhe h ab nach einem bekannten Gesetze $\rho = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}}$, worin H die Höhe der homogenen Atmosphäre, 8000 m, bedeutet, ρ_0 sich auf die Ausgangshöhe bezieht. Haben wir es mit einem Ballon zu tun, dessen Querschnitt konstant bleibt, also etwa mit einem prall steigenden Freiballon, so können wir den Widerstand als Funktion der Höhe ansetzen als

$$W = R_0 e^{-\frac{h}{H}} v^2, \qquad R_0 = \frac{1}{3} k \frac{\rho_0}{g} F.$$

Haben wir es aber mit einem Ballon konstanten Gasgewichtes zu tun, so verändert sich beim Aufstieg dessen Volumen und Querschnitt. Wenn wir in Annäherung einen solchen Ballon stets als Kugel annehmen, so nimmt ihr Querschnitt umgekehrt

zu wie $p^{\frac{2}{3}}$, worin p den Druck bedeutet, der mit der Höhe nach dem Gesetze $p = p_0 e^{-\frac{h}{H}}$ abnimmt. Für einen Ballon konstanten Gasgewichtes, diesen stets als Kugel angenommen, haben wir folglich

$$W = R_0 e^{-\frac{h}{3H}} v^2, \qquad R_0 = \frac{1}{3} k \frac{\rho_0}{g} F_0,$$

worin sich der Index 0 auf die Ausgangshöhe bezieht.

A) *Der Aufstieg eines Ballones konstanten Gasvolumens.*

Der Ballon sei abgewogen und ihm durch Ballastabgabe eine Steigkraft von g Kilogramm gegeben; $\mathfrak{H}$ sei die Normalhöhe, die er erreicht. Emporsteigen wird die Füllung nebst allem, was von ihr getragen wird. Beim Aufstieg nimmt der Auftrieb, aber auch die Füllung ab, und wir sind in der interessanten Lage, die Bewegung eines Systems von variabler Masse behandeln zu können. Da zeigt es sich nun merkwürdigerweise, daß, wenn wir die Veränderung von Masse und Tragkraft mit der Höhe berücksichtigen, wir die Geschwindigkeit an jeder Stelle mit voller Exaktheit berechnen können, während, wenn wir die Masse als konstant, oder sowohl Masse wie Auftrieb als konstant annehmen, welch letzterer Fall sich bei der Behandlung des Ballones konstanten Gasgewichtes einstellt, sich diese Berechnung nur in großer Annäherung durchführen läßt. Wie eine leichte Überlegung an Hand von Gleichung 11 zeigt, ist die ganze Masse M, die emporgehoben wird, also Füllung plus Belastung, stets gleich der Masse der verdrängten Luft und nimmt deshalb ab nach dem Gesetze $M = M_0 e^{-\frac{h}{H}}$. Wir führen zwecks größerer Anschaulichkeit noch eine Zusatzstrecke σ ein,

$$\sigma = \frac{M_0}{2 R_0} = \frac{D}{k} = \frac{D}{0{,}7} \text{ Meter} = \text{rund } 20 \text{ Meter},$$

wobei D den Durchmesser des Ballones bedeutet. Da von 1600 cbm bis 2200 cbm Volumen der Ballondurchmesser nur von 10,5 bis 16,2 m ansteigt, nehmen wir mit genügender Genauigkeit stets $\sigma = 20$ m an.

Wir behandeln hier nur den Fall, der für uns Interesse hat, indem wir annehmen, die Entlastung g sei so groß, daß der Ballon in einer Höhe ins Gleichgewicht kommt, die groß ist gegen σ, aber nicht größer wie etwa 1000—1500 m. Dann ergibt die Untersuchung folgendes: Die Steiggeschwindigkeit des Ballones nimmt anfangs rasch zu; selbstverständlich, da derselbe von einer Ruhelage aus sich in Bewegung setzt. Allein schon in einer Höhe von etwa 4σ, also etwa 80 m, fängt der Ballon an, seinen Auf-

stieg zu verlangsamen, und steigt nun mit stetig abnehmender Geschwindigkeit bis zu der durch seine Tragkraft bedingten Gleichgewichtslage. Allein in dieser Höhe ist seine Geschwindigkeit noch nicht Null geworden, die lebendige Kraft läßt ihn diese Höhe noch um eine Strecke überschreiten, die sich für alle Ballone, unabhängig von der Art der Füllung, zu $\sigma = 20$ Meter ergibt. In dieser neuen Höhe kann der Ballon aber nicht im Gleichgewicht sein; er hat durch dies Überschreiten seiner Normalhöhe eine Sinkkraft erhalten, die sich nach dem Ballastgesetz zu $^1/_4\%$ seiner Tragkraft berechnet, die ihn wieder tiefer führend in einen Ballon konstanten Gasgewichtes verwandelt und zur Landung bringt. Tatsächlich zeigt sich auch auf vielen Fahrdiagrammen, daß der Ballon in die Tiefe strebt, sowie die Wirkung einer Ballastabgabe aufhört.

Der Führer kann dem leicht vorbeugen, indem er, wenn das Steigen des Ballones zu Ende ist, noch etwa 1—2 kg Ballast ($^1/_4\%$ seiner Tragkraft) ausgibt. Theoretisch müßte jede Ballastausgabe einen Ballon zur Überschreitung seiner Gleichgewichtslage und damit zur Landung bringen. Daß dieser Rückschlag einer Ballastausgabe nicht stets eintritt, ist darin begründet, daß wir bei diesen Berechnungen und Betrachtungen abgesehen haben von Temperaturänderungen. Bei Fahrten bei Tage ist wohl ausnahmslos durch Strahlungseinflüsse das Gas wärmer wie die umgebende Luft. Steigt der Ballon, so kühlt sich das Gas ab durch Ausdehnung (vgl. § 16) und dadurch, daß kühlere Luft an der Hülle vorbei streicht. Kommt der Ballon zum Stillstand, so bessert sich seine Temperatur rasch etwas auf, und der dadurch bedingte Gewinn an Tragkraft ersetzt die sonst nötige, kleine Ballastausgabe.

Da der weitaus größte Teil der Steigzeit auf die mittlere Periode fällt, so läßt sich dieselbe für die Praxis mit genügender Genauigkeit berechnen, wenn wir absehen von den kurzen Perioden zu Beginn und Ende der Bewegung. Bezeichnen wir die Normaltragkraft des Gases mit T_0, den Ballondurchmesser mit D, die durch die Ballastabgabe g erreichte Höhe mit $\mathfrak{H}$, so erhalten wir für die Steigzeit Z mit genügender Genauigkeit

$$(27) \qquad Z = 38{,}5 \sqrt{\frac{\mathfrak{H}}{D T_0}} = \frac{4750}{D^2 T_0} \sqrt{g} \text{ Sekunden.}$$

Die Durchmesser der Ballones von 1200—1600 cbm können wir mit genügender Genauigkeit gleich 14 m setzen (entsprechend 1440 cbm) und erhalten

für $D = 14$ m und Leuchtgasfüllung

$$Z = 12 \sqrt{\mathfrak{H}} = 34 \sqrt{g} \text{ Sekunden}$$

für $D = 14$ m und Wasserstoffüllung

$$Z = 9{,}5 \sqrt{\mathfrak{H}} = 20 \sqrt{g} \text{ Sekunden}$$

für $D = 10{,}5$ m ($V = 600$ cbm) und Wasserstoffüllung

$$Z = 10{,}5 \sqrt{\mathfrak{H}} = 36 \sqrt{g} \text{ Sekunden.}$$

Dabei ist zu bemerken, daß die obersten Partien der Steigstrecke unverhältnismäßig große Zeiten in Anspruch nehmen. Beispielsweise wird das oberste Viertel der Strecke in $^1/_2$, das oberste Hundertstel erst in $^1/_{10}$ der ganzen Steigzeit zurückgelegt.

B. *Steig- und Fallgeschwindigkeit eines Ballones konstanten Gasgewichtes.*

Die Verhältnisse liegen hier wesentlich einfacher wie im Falle A. Von Temperaturschwankungen abgesehen, bleibt die Steigkraft oder Sinkkraft des Ballones g unterhalb seiner Prallhöhe konstant; für die Masse ist dies selbstverständlich. Trotzdem läßt sich die Bewegungsgleichung nur in großer Annäherung auflösen. Es ergibt sich folgendes: Wird dem in einer Gleichgewichtslage schwebenden Ballon Steig- oder Sinkkraft gegeben, so setzt er sich mit anfangs rasch zunehmender Geschwindigkeit nach oben oder unten in Bewegung. Aber schon nach kurzer Zeit, während welcher der Ballon eine Strecke von 60 bis 80 m (3σ—4σ) zurückgelegt, nimmt dieselbe so langsam zu, daß sie sich pro 1000 m zurückgelegter Strecke jeweils nur um $2\%_0$ ihres Wertes vergrößert. Praktisch kann diese Geschwindigkeit, da wir ja auch von Wärmeschwankungen absehen, konstant angenommen werden. Sie berechnet sich dann zu

$$(28) \qquad \mathfrak{v} = \sqrt{\frac{g}{R_0}} \text{ Meter pro Sekunde.}$$

Für R_0 ist der Faktor des Luftwiderstandes einzusetzen, der sich auf die Ausgangslage bezieht (siehe S. 77). Haben wir es mit nicht gar zu schlaffen Kugelballonen zu tun, so können wir mit einer Genauigkeit, die für praktische Anwendung längst ausreicht, den größten Querschnitt des Ballones ansetzen. Wir können so für den 600 und 1440 cbm Ballon in der folgenden kleinen Tabelle verschiedene Steig- und Sinkkräfte und zugehörige Geschwindigkeiten zusammenstellen. (Siehe Tabelle S. 81.)

Die Zahlen dieser kleinen Tabelle sind für eine überlegte Ballonführung von doppeltem Interesse.

Die Geschwindigkeiten, an und für sich klein (ein Sprung aus einer Höhe von 1 m gibt eine Endgeschwindigkeit von $4^1/_2$ m/sek.), wachsen mit steigender Treibkraft nur langsam an. Ist ein Ballon im Fallen mit einer Geschwindigkeit von 2—3 m/sek., so kann

Tabelle der Steig- und Sinkgeschwindigkeiten.

	$V = 600$ cbm	1440 cbm
	m/sek.	m/sek.
g = 10 kg	1,9	1,5
20	2,7	2,1
30	3,4	2,5
40	3,9	2,9
50	4,3	3,3
60	4,7	3,6
70	5,1	3,9
80	5,5	4,2
90	5,8	4,4
100	6,1	4,6

der Fall nur durch sehr kräftiges Ventilziehen beschleunigt werden. Ist die Fallgeschwindigkeit des 1440 cbm-Ballones 2,5 m/sek. und soll dieselbe nur 1 m/sek. gesteigert werden, so ist so ausgiebig Ventil zu ziehen, daß die nötige Menge Bremsballast um 30 kg ansteigt. *Ist der Ballon im Fallen mit einer Geschwindigkeit von 2—3 m/sek., so sollte der Führer nur in Ausnahmefällen, wo es von äußerster Wichtigkeit ist, diesseits eines bestimmten Punktes zu landen, den Fall durch Ventilzug zu beschleunigen suchen; der Gewinn an Zeit steht in keinem Verhältnis zu dem Anwachsen der zur Landung notwendigen Ballastmenge.*

Aus der Sinkgeschwindigkeit kann weiter auf die Sinkkraft geschlossen werden. Bestimmt der Führer die Zeit, die verstreicht, bis das Fahraneroid einen Fall um 100 m angezeigt, so kennt er die Sinkkraft, also die in diesem Momente nötige Menge Bremsballast. Ein von Dr. Bestelmeyer konstruiertes Ballonvariometer erlaubt, diese Geschwindigkeit direkt abzulesen. Auch die einfache Anwendung der bekannten Papierschnitzel, je nach ihrer Fallgeschwindigkeit verschieden gefärbt, leistet wertvolle Dienste.

Der Führer eines Ballones mittlerer Größe, der wiederholt die Zeit mißt, die einem Durchfallen von 150 m entspricht, und durch Ballastauswurf diese nicht über 1 Minute ansteigen läßt, entsprechend einer Fallgeschwindigkeit von $2^1/_2$ m/sek., wird die Sinkkraft unterhalb etwa 30 kg halten, so daß sie bereits durch das Schlepptau aufgehoben werden kann. Sind keine heißen Bodenschichten vorhanden, so wird er gegen unliebsame Überraschungen bei der Landung wirksam gesichert sein. *Dies Verfahren ist so bequem und wenig Zeit und Aufmerksamkeit in Anspruch nehmend, daß es im Interesse größtmöglicher Sicherheit bei der Landung, wenn immer möglich, angewandt werden sollte.*

Von Interesse und Wichtigkeit ist es, die Steiggeschwindigkeiten praller und schlaffer Freiballone zu vergleichen. Es ergiebt sich folgender Satz:

Werden ein praller und ein (genügend) schlaffer Ballon gleicher Größe, im gleichen Niveau im Gleichgewicht, um gleichviel Kilogramm entlastet, so braucht der erstere zur Erreichung seiner neuen Gleichgewichtshöhe das Doppelte der Zeit, in welcher der andere zur selben Höhe emporsteigt.

Von welcher praktischen Bedeutung dieser Satz sein kann, wird sich in Beispiel 47—49 zeigen.

C. *Das Abfangen eines Ballones.*

Wird die zum Abfangen eines Ballones nötige Menge Bremsballast ausgegeben, so wird seine Sinkkraft gleich Null; er bewegt sich aber infolge seiner lebendigen Kraft noch weiter. Seine Geschwindigkeit nimmt rasch ab, ohne aber jemals gänzlich zu verschwinden. Nach Durchlaufen einer Strecke von $4\sigma = 80$ m hat sich die Geschwindigkeit auf $^1/_{50}$ ihres Anfangswertes vermindert, kann von da ab also praktisch vernachlässigt werden; allein erst die Landung setzt der Abwärtsbewegung definitiv ein Ende. Nach Durchlaufen einer Strecke von 20 m hat die Geschwindigkeit erst etwa auf $^2/_5$ abgenommen, nach 40 m etwa $^1/_8$. *Soll der Fall auf verhältnismäßig kurze Distanz* **vollständig** *gebremst werden, so ist dies nur durch Überwerfen, und zwar starkes Überwerfen möglich.* Wird um 100% überworfen, d. h. die doppelte Menge des Bremsballastes ausgegeben, so läuft der Ballon noch etwa $\frac{7}{10}\sigma = 13$ m weiter; bei Überwerfen um 50% noch 20 m, bei 10% noch 50 m. Daraus folgt, daß namentlich bei der Landung ohne Schlepptau ein Überwerfen beinahe unvermeidlich sein wird. Strecken von 40—80 m kommen hier wohl in Betracht; soll in kürzerer Strecke der Ballon zum Stillstand kommen, so muß um mehr als 10% überworfen und die neu erhaltene Steigkraft im geeigneten Momente durch Ventilzug ausgeglichen werden. Das sicherste Mittel, diesem Überwerfen bei der Landung vorzubeugen ist, das Schlepptau. *Immer aber mögen die Führer beachten, daß die Wirkung einer Ballastabgabe erst nach einiger Zeit praktisch vollständig ist.* Wird z. B. der Bremsballast ausgegeben, während der Ballon mit einer Geschwindigkeit von 3 m/sek. fällt, so durchläuft er die nächsten 40 m, wobei die Geschwindigkeit auf $^1/_8$ sinkt, in etwa 30 Sekunden; 80 m, wobei die Geschwindigkeit auf $^1/_{50}$ sinkt, in $1^1/_2$ Minuten. Hatte der Ballon zur Zeit der Ballastausgabe eine andere Geschwindigkeit, so sind die angegebenen Zeiten dieser umgekehrt proportional. Bei Nicht-

beachtung dieser Verhältnisse oder nervöser Ballastausgabe kann leicht um 50% überworfen werden und der richtig bemessene Bremsballast sich als zu knapp erweisen. *Regulierung der Fallgeschwindigkeit, wie unter B auseinandergesetzt, in einem Maße, daß das schließliche Abfangen durch das Schlepptau vollzogen wird, ist das sicherste Mittel, um Überwerfen und Ballastverschwendung zu verhüten.*

D. *Abfangen mit Hilfe des Schlepptaus.*

Der Ballon besitze schließlich noch eine Sinkkraft, die kleiner ist als das Gewicht des Schlepptaus. Wiegt 1 m desselben p Kilogramm, so ist die Sinkkraft annulliert, wenn von dem Augenblicke, wo das Schlepptau den Boden berührt, der Ballon noch h Meter tiefer sinkt, so daß ph Kilogramm gleich der Sinkkraft sind. Allein der Ballon besitzt dann noch lebendige Kraft, und geht deshalb, unabhängig vom Gewichte des Schlepptaus, eine Strecke σ, etwa $= 20$ m, weiter in die Tiefe. (Das ist dieselbe Strecke, um die der steigende Ballon seine obere Gleichgewichtslage überschreitet, vgl. A.). Der Ballon hat dadurch Steigkraft erhalten gleich dem Gewichte von 20 m Schlepptau, er kehrt wieder nach oben um, das Schlepptau hoch nehmend und sich damit stetig belastend geht er mit abnehmender Geschwindigkeit in seine Gleichgewichtslage zurück, überschreitet diese nach oben und pendelt so in starkgedämpften Schwingungen um diese herum. Nur bei einem sehr leichten Schlepptau, das pro Meter weniger als 100 g wiegt, würde er aufwärts gehend seiner Gleichgewichtslage mit stetig abnehmender Geschwindigkeit (aperiodisch) zustreben. Da der Ballon abwärts gehend seine Gleichgewichtslage um etwa 20 m überschreitet, mit Höhen von Häusern, Bäumen usw. von etwa 20—30 m gerechnet werden muß, so daß diese in etwa 50 m Höhe liegen soll, darf das Schlepptau nicht zu kurz sein. Am zweckmäßigsten setzt man dasselbe aus zwei Teilen zusammen, derart, daß etwa 50 m leichtes Seil den Ballon mit einem schweren Seil, welches die eigentliche Entlastung besorgt, verbinden.

Beispiel 47. Aus einer belagerten Festung steigen ein 600 cbm Wasserstoffballon und ein 1440 cbm Leuchtgasballon prall gefüllt auf, ersterer mit 7, letzterer mit 9 Sack Steigkraft. Um welche Strecke sind sie bis zur Erreichung ihrer Normalhöhe bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/sec. abgetrieben? — Mit Hilfe unserer Tafeln finden wir, daß die Normalhöhen in 990 resp. 910 m Höhe liegen. Die Formeln 27) liefern die Steigzeiten 330 resp. 355 Sekunden. Die Abtrift beträgt etwa $3^1/_2$ km; dabei ist der kleinere Wasserstoffballon bei ungefähr gleicher Nutzlast etwa 100 m höher gekommen. Schlaff, mit gleicher

Steigkraft hochgelassen, hätte jeder Ballon seine Höhe in der halben Zeit erreicht.

Beispiel 48. Aus einer belagerten Festung soll der 600 cbm Ballon ausfliegen und dabei eine Höhe von mindestens 2500 m erreichen. Der Wind wehe mit einer Geschwindigkeit von 36 km pro Stunde; der Ballon soll 2000 m Höhe erreichen, ehe er 5 km abgetrieben ist. Wieviel Kubikmeter Wasserstoffgas sind einzufüllen, damit er ein Maximum von Nachrichtenmaterial mit sich führen kann? — Wir finden mit Hilfe unserer Tafeln I und II, daß wir 600 *cbm* Wasserstoff in 2500 m Höhe noch mit 526 kg belasten können. Dies ist also die höchste zulässige Belastung. Wir werden zur Erreichung großer Steiggeschwindigkeit mit schlaffem Ballon abfahren und im Interesse größter Nutzlast seine Prallhöhe in 2000 m Höhe verlegen. Wir finden, mit Hilfe der Höhenzahlen oder unserer Tafel, daß wir 467 cbm Wasserstoffgas einzufüllen haben, welche 560 kg heben können. Die Windgeschwindigkeit bedingt, daß der Ballon mit einer Geschwindigkeit von 4 m/sec. steigen muß; dazu haben wir ihm nach der Tabelle S. 81 eine Steigkraft von 40 kg zu geben; die Belastung bei der Abfahrt kann somit 520 kg betragen (ist also kleiner wie die mögliche Belastung in 2500 m Höhe). Rechnen wir das Ballongewicht 232 kg, Führer 76 kg, 6 Sack Ballast für die Fahrt 72 kg, so bleiben für Depeschen und Nachrichtenmaterial noch 140 kg verfügbar. So belastet wird der mit 470 cbm Wasserstoff gefüllte Ballon in $8^1/_8$ Minuten auf 2000 m emporsteigen und nach weiteren $3^3/_4$ Minuten in 2600 m seine Gleichgewichtslage erreichen.

Beispiel 49. Eine wichtige Aufgabe für den Luftschifferoffizier besteht darin, bei Tage einen Freiballon vor feindlichem Geschützfeuer gesichert aus einer belagerten Festung hinauszubringen. Es handelt sich dabei um die Bestimmung der Steiggeschwindigkeit, die einem Ballon gegeben werden muß, damit ihn ein Wind von bestimmter Stärke nicht in die Gefahrzone der feindlichen Batterien führt. Wie man zu verfahren hat, möge an einem einfachen Beispiele gezeigt werden. Die mit 7 km weit tragenden Flachbahngeschützen montierten Batterien stehen in Windrichtung 12 km entfernt. Nimmt man an, daß bei der maximalen Schußweite die Scheitelhöhe der Geschoßbahn in 1000 m Höhe liegt und der Einfallswinkel des Geschosses etwa 60^0 beträgt, so wird man gegen Schuß völlig gesichert sein, wenn nach Abtrift des Ballones um 6 km der Ballon 1 km hoch steht. Dadurch ergibt sich die Regel: *Die Steiggeschwindigkeit betrage $^1/_6$ der Windgeschwindigkeit,* welche Regel auch unter anderen Verhältnissen gute Dienste leisten wird.

Dadurch ergibt sich für den 600 cbm Wasserstoffballon folgende kleine Tabelle.

Windgeschwindigkeit m/sec	Steiggeschwindigkeit m/sec	Steigkraft kg	Normalhöhe m
3	0,5	1	1010
6	1	3	1030
9	1,5	6	1070
12	2	10	1120
15	2,5	17	1200
18	3	24	1300

Wir sehen, daß mit kleinen Steigkräften auszukommen ist. Dabei darf der Ballon nicht prall gefüllt werden, sondern einer Prallhöhe von 1000 m entsprechend nur mit 530 cbm. Mit dieser Menge Wasserstoffüllung und angegebenen Steigkraft erreicht der Ballon die angegebenen Normalhöhen.

Befürchtet man Ballongeschütze in einer Entfernung von 12 km vom Aufstiegsort, und betrachtet man sich in einer Höhe von 2000 m hinlänglich gesichert, so behalten die Zahlen der ersten drei Kolonnen dieser kleinen Tabelle immer noch Gültigkeit. Doch darf dann der Ballon nur mit 465 cbm gefüllt werden; die Prallhöhe liegt in 2000 m Höhe.

E. *Schwingungen eines Ballones.*

Die vorstehenden Betrachtungen dieses Paragraphen sind durchgeführt, ohne auf die Temperaturänderungen von Gas und Atmosphäre Rücksicht zu nehmen. Diese kommen um so mehr zur Geltung, je geringere Steig- oder Sinkkräfte rein mechanischen Ursprungs den Ballon angreifen. An Stelle fortgesetzter Steig- oder Sinkbewegung kann dann unter geeigneten Umständen ein abwechselndes Auf- und Abgehen, ein Schwingen um eine mittlere Gleichgewichtslage treten. Bewegt sich der Ballon, einer sehr geringen Sinkkraft folgend, abwärts, etwa dadurch, daß ihn Ballastausgabe oder ein schwacher Windstoß über seine Gleichgewichtslage emporgehoben hatte, und nimmt durch Kompression die Gastemperatur rascher zu wie die Temperatur der durchfallenen Luftschicht, so gewinnt er an Steigkraft, und umkehrend die Gleichgewichtslage wieder nach oben überschreitend kühlt sich nun umgekehrt das Gas ab unter die Temperatur der umgebenden Atmosphäre. Damit sich auf diese Weise stets bei Überschreitung der Gleichgewichtslage eine Kraft einstellt, die nach dieser hingerichtet ist, wie bei einem schwingenden Pendel, muß offenbar der

Fall LIII der Figur 2 vorliegen. Bei den kleinen, treibenden Kräften bilden sich nur geringe Geschwindigkeiten aus, so daß die Dämpfung dieser Schwingungen durch Luftwiderstand nur sehr gering ist. Die Dauer dieser Schwingungen (es sind schwach gedämpfte, harmonische Schwingungen) läßt sich leicht berechnen. Würde sich bei Vertikalverschiebung um 100 m die Temperatur des Gases um γ^0, die der Atmosphäre um β^0 ändern, so wird für eine vollständige Schwingung, unabhängig von der Größe des Ausschlages, die Dauer

$$29)\qquad T = \frac{315}{\sqrt{(\gamma - \beta)}} \text{ Sekunden.}$$

Nehmen wir als Grenzfall normaler atmosphärischer Verhältnisse eine isotherme Schicht an, $\beta = 0$, und für γ seinen größten, möglichen Wert 1, so erhalten wir $T = 5$ Minuten. Dies sind die raschesten Schwingungen, die möglich sind. Die Schwingungsdauer kann von da an bis unendlich zunehmen ($\gamma = \beta$); doch werden zu langsame Schwingungen nicht mehr auftreten, da bei diesen das Gas Zeit finden würde, seine Temperatur mit der Umgebung auszugleichen.

Beispiel 50. Wir setzen (vgl. Beispiel 44—46) $\gamma = 0{,}4$; $\beta = 0{,}2$; und erhalten eine Schwingungsdauer von $11^2/_8$ Minuten; $\gamma = 0{,}4$, $\beta = 0{,}3$, oder $\gamma = 0{,}3$, $\beta = 0{,}2$ würde die Zeit eines Hin- und Herganges auf $16^1/_8$ Minuten erhöhen. Auf zahlreichen Fahrtdiagrammen lassen sich Schwingungen nachweisen, deren Dauer von dieser Größenordnung ist.

§ 18. Der Marsch am Schlepptau.

Wir haben in § 17 das Schlepptau bei richtigem Gebrauche als wirksamstes Hilfsmittel kennen gelernt, um sich gegen Überwerfen zu schützen. Einen Teil des Schlepptaus niederlegend schwebt der schlaffe Ballon in einer stabilen Gleichgewichtslage; bei Verschiebungen nach oben oder unten erhält er durch die aufgenommenen oder niedergelegten Stücke Schlepptau Sink- oder Steigkraft, die ihn wieder in seine Gleichgewichtslage zurückführen. Leichter Wind drückt ihn etwas nieder, stärkerer Wind veranlaßt ihn zum Marsch am Schlepptau.

Diese Verhältnisse sollen näher untersucht werden; das Wesentliche derselben finden wir unter vereinfachten Bedingungen beim Fesselballon wieder.

Ein Fesselballon steige bei völliger Windstille auf; ein Meter des Haltekabels wiege p Kilogramm. Wir haben zu unter-

scheiden, ob der steigende Ballon von konstantem Volumen oder von konstantem Gasgewicht ist.

Ein Ballon von konstantem Volumen V, etwa ein prall gefüllter Freiballon, oder der vollständig gefüllte, beim Aufstieg durch das Ventil Gas abgebende Drachenballon, vermindert die Tragkraft um $\frac{1}{8000}$ seines Wertes, so oft er um 1 m höher steigt. Ist die Tragkraft des Gases am Aufstiegsort T Kilogramm, so besitzt die Füllung in Höhe h Meter eine Tragkraft von $VT - VT\frac{h}{8000}$ kg. War die Füllung am Aufstiegsorte mit G Kilogramm belastet, so ist die Belastung in der Höhe h um das Gewicht des gehobenen Kabels, ph Kilogramm, gestiegen. Die maximale Steighöhe ist deshalb durch die Bedingung

$$VT - VT\frac{h}{8000} = G + ph$$

bestimmt und berechnet sich zu

$$h = 8000\frac{VT - G}{VT + 8000p} \text{ Meter.} \tag{30}$$

Ist andererseits ein Ballon nur mit V' Kubikmeter angefüllt, derart, daß er sich frühestens in der möglichen Maximalhöhe vollständig aufgefüllt hat, lassen wir etwa den Drachenballon wiederholt steigen, ohne ihn nachgefüllt zu haben (das Gasvolumen V' am Aufstiegsorte ist dann gleich $\frac{V}{n}$, wo n die der vorher erreichten Maximalhöhe zugehörige Höhenzahl bedeutet), so steigt derselbe mit der konstanten Tragkraft $V'T$, und die maximale Steighöhe, in welcher die Belastung wieder $G + ph$ wird, ist bestimmt durch

$$h = \frac{V'T - G}{p} \text{ Meter.} \tag{30a}$$

(Für den Drachenballon ergibt sich in beiden Fällen selbstverständlich derselbe Wert.)

Das Kabel steigt von der Winde senkrecht empor, der Zug an der Winde ist Null.

Während der Ballon in seiner *größtmöglichen* Höhe schwebt, erhebe sich ein Wind von der Stärke w m/sec.; sein Druck auf den Ballon sei K Kilogramm; der Winddruck auf das Kabel werde vernachlässigt. Das Kabel steigt jetzt an der Winde nicht mehr senkrecht empor, sondern geht, wenn wir von seiner Steifigkeit absehen können, selbst beim leistesten Luftzuge, horizontal ab und steigt in Gestalt einer Kurve, der so-

genannten Kettenlinie, zum Ballon empor, der nun in einer geringeren Höhe unter Einfluß von Tragkraft, Seilspannung und Winddruck ins Gleichgewicht kommt. (Die Tragkraft des Ballones ist, da derselbe tiefer zu stehen kommt, konstant geblieben!) Der Zug an der Winde ist nun nicht mehr gleich Null, sondern diese wird horizontal in Richtung gezogen mit einer Kraft, die, wie sich zeigen läßt, genau gleich ist dem Drucke des Windes auf den Ballon, also K Kilogramm. Ist die Winde nicht festgebremst und steht sie genügend hoch, so wickelt sich mehr Kabel ab, richtet sich erst nach abwärts und steigt nach Passierung seines Durchhangs zum Ballon auf, der immer tiefer zu stehen kommt; *immer aber bleibt die Kabellänge vom tiefsten Punkte des Durchhanges bis zum Ballon unverändert h Meter, und bleibt die Spannung des Kabels im tiefsten Punkte des Durchhanges Kilogramm, horizontal gerichtet.* Ist dagegen die Winde festgebremst, so läßt sich die neue, kleinere Höhe h_1 des Ballones durch folgende Konstruktion finden.

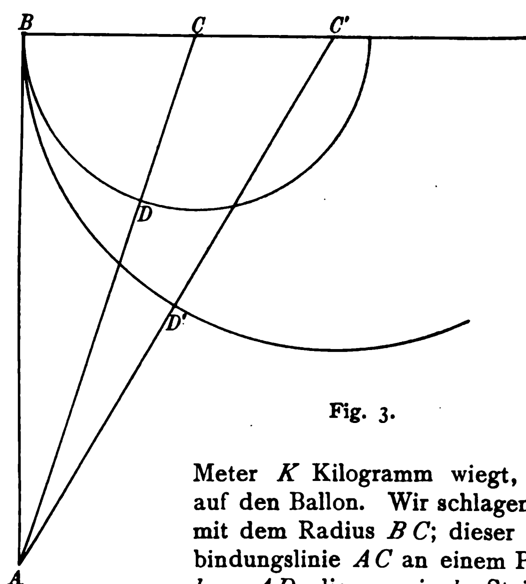


Fig. 3.

Es sei A der Befestigungspunkt des Kabels, B der Ballon in maximaler Höhe bei Windstille, so daß wir haben AB senkrecht und gleich h Meter. Wir ziehen durch B eine Horizontale und tragen auf derselben eine Strecke BC ab, so bemessen, daß ein Stück des Kabels von der Länge BC Meter K Kilogramm wiegt, K der Winddruck auf den Ballon. Wir schlagen um C einen Kreis mit dem Radius BC; dieser schneidet die Verbindungslinie AC an einem Punkte D. Dann ist $h_1 = AD$ die *maximale* Steighöhe bei diesem Winde. Nimmt dessen Stärke zu, so vergrößert sich BC zu BC', der Kreis wird größer, die Strecke AD' aber und damit die Ballonhöhe kleiner.

Diese Konstruktionen können wir auch in eine Formel umsetzen:

31) $$h_1 = \frac{1}{p}\left[\sqrt{p^2h^2 + K^2} - K\right] \text{ Meter.}$$

Dabei ist, wie schon oben bemerkt, der Einfluß des Winddruckes auf das Kabel vernachlässigt; derselbe kann diese Höhe leicht um etwa 10% erniedrigen. Ähnlich, nur verwickelter, liegen die Verhältnisse, wenn der Ballon nicht seine Maximalhöhen erreicht, d. h. daß bei Windstille der vertikale Zug an der Winde nicht Null ist. Für unsere Zwecke genügt der einfachere Fall, denn der durch das Schlepptau äquilibrierte Ballon ist ein Fesselballon in seiner maximalen Höhe.

Angenommen, die Winde sei festgestellt, aber der Wagen mit der Winde stehe nicht fest; seine Räder seien leicht gebremst, so daß er durch eine Kraft k in Richtung des Windes fortgezogen werden kann. Ist der Zug des Kabels, den wir zu K Kilogramm bestimmten, größer als k, so zieht der Ballon den Wagen nach sich. Ist die horizontale Geschwindigkeit, die der Ballon dabei erlangt, v Meter, so trifft der Wind den Ballon nur noch mit einer Geschwindigkeit $(w - v)$ Meter/Sek., und der Winddruck K, entsprechend einer Geschwindigkeit w, sinkt herab auf einen Winddruck K', entsprechend der Geschwindigkeit $(w - v)$. So lange K' größer ist als k, wird der Wagen seine Geschwindigkeit erhöhen, bis schließlich die Geschwindigkeit v einen Wert erreicht hat, derart, daß der Winddruck K', entsprechend der Geschwindigkeit $w - v$, auf k abgenommen hat. Der Ballon wird jetzt nur noch von dem Winde $w - v$ getroffen, der horizontale Zug des Kabels an der Winde beträgt $K' = k$ Kilogramm. Die Verhältnisse sind also vollständig dieselben, als würde der Wagen mit der Winde ruhig stehen und hätte die Geschwindigkeit des Windes von w auf $(w - v)$ Meter/Sekunden abgenommen. *Wir erhalten demnach die Steighöhe des Ballones bei bewegtem Wagen, wenn wir in Formel 31 für k die Kraft setzen, die zum Fortbewegen des Wagens gehört,* denn k ist gleich K', entsprechend der Windgeschwindigkeit $(w - v)$. Je kräftiger der Wagen gebremst wird, desto kleiner ist die Geschwindigkeit v, die er erhält (die Null bleiben kann, solange der Winddruck nicht größer wie k wird), desto größer $(w - v)$, und desto geringer die Steighöhe. Würde der Wagen vollkommen reibungslos gleiten, so würde die Steighöhe dieselbe sein wie bei Windstille; denn der Ballon würde eine Geschwindigkeit w erlangen, und der Winddruck wäre gleich Null.

Die Anwendung des Erläuterten auf den landenden Ballon ergibt sich ungemein einfach. Derselbe sei bei Windstille niedergegangen mit einer Sinkkraft, kleiner als das Gewicht des Schlepptaus, dessen Länge wir mit AB bezeichnen. Ein Stück des Schlepptaus von der Länge AC, an Gewicht gleich der Sinkkraft, wird sich dann auf die Erde niederlegen, und

in einer Höhe CB senkrecht über C wird der Ballon in einer stabilen Gleichgewichtslage schweben. Diese Höhe berechnet sich nach Formel 30a; die Verhältnisse sind dieselben wie bei einem Fesselballon, der bei Windstille in seiner maximalen Höhe schwebt. Um das Stück AC des Schlepptaus über den rauhen Erdboden hinwegzuziehen, muß eine Zugkraft von k Kilogramm aufgewandt werden. Nun erhebe sich ein Wind w; ist der Winddruck K auf den Ballon kleiner wie k, so bleibt das niedergelegte Stück Schlepptau ruhig liegen; das Stück CB steht aber nicht mehr senkrecht, sondern im Punkt C die Erdoberfläche tangierend, steigt es in Form einer Kettenlinie zum niedriger stehenden Ballon empor. Wir haben einen Fesselballon an stillstehender Winde, seine Höhe berechnet sich nach Formel 31. Steigert sich aber die Windgeschwindigkeit derart, daß der Winddruck K größer wie k wird, so zieht das unterste, *stets horizontal liegende* Längenelement des Seilstückes CB das Stück AC, *ohne dasselbe zu heben*, nach sich; wir haben den Fall eines Fesselballons, der den Wagen nach sich zieht. Der Ballon eilt mit einer Geschwindigkeit v davon, so bemessen, daß der Wind mit einer Geschwindigkeit $(w - v)$ den Ballon treffend den Druck $K' = k$ Kilogramm erzeugt, der nötig ist, das Taustück von der *unveränderlichen* Länge AC nach sich zu ziehen. *Mag die Windgeschwindigkeit sich beliebig steigern, die Taustrecken AC und CB behalten ihre Längen unverändert bei, und die Ballongeschwindigkeit reguliert sich stets so, daß der Winddruck, entsprechend der Windgeschwindigkeit $(w - v)$, gleich k bleibt.* Die Höhe des Ballones über dem Erdboden berechnet sich nach Formel 31, worin $K = k$ zu setzen ist. Nimmt man in Annäherung an, daß die Reibung des Schlepptaus am Boden nach den Gesetzen der gleitenden Reibung vor sich geht, wonach der Widerstand unabhängig von der Geschwindigkeit ist, so bleibt auch k konstant und es folgt: *Die Höhe über dem Erdboden, in welcher der Ballon am Schlepptau davon eilt, ist unabhängig von der Windgeschwindigkeit. Mit steigender Windgeschwindigkeit w steigt die Ballongeschwindigkeit v* derart, *daß $(w - v)$, $K' = k$ und die Höhe h_1 über dem Erdboden ungeändert bleiben.*

Diese Höhe ist außerordentlich beeinflußt von der Beschaffenheit des Bodens, über den das Schlepptau hingleitet. Je größeren Widerstand das gleitende Tau findet, desto größer wird die zur Bewegung nötige Zugkraft, mit desto größerer Geschwindigkeit $(w - v)$ muß der Wind den Ballon treffen; der Ballon eilt langsamer und der vermehrte Winddruck vermindert die Höhe. Je leichter das Schlepptau gleitet, desto rascher marschiert der Ballon, erleidet er geringeren Winddruck und gewinnt an Höhe. Trifft das über einen rauhen Acker oder Bäume hinweggleitende Schlepptau auf glatten Wiesenboden, auf

dem es bedeutend weniger Widerstand findet, so geht der Ballon sofort höher. Der Führer lasse sich dadurch nicht täuschen, dem Ballon neue Steigkraft zuzuschreiben, denn die Länge *CB* des Schlepptaus bleibt dabei konstant.

Nach einigen vorläufigen, orientierenden Versuchen, bei denen je 60 m Schlepptau von 18 und 28 kg geschleppt wurden, zeigte sich die nötige Zugkraft bei ebenem Boden unabhängig von der Geschwindigkeit, merkwürdigerweise beim Gleiten über einen festen Sandweg bei beiden Stücken gleich, zu etwa 25 bis 28 kg. Es scheint dies daher zu rühren, daß das schwere Tau sich eine Rille gräbt, in der es leichter gleitet. Zum Schleifen durch nasses, hohes Gras waren 23 resp. 30 kg nötig. Über Bäume geschleppt erfordert das schwerere Tau 44 kg, über eine Bretterwand, Telegraphendrähte und eine Wiese hinweg 59 kg. Zum Schleppen über dichten Waldbestand hinweg werden zweifellos noch größere Zugkräfte nötig sein.

Ehe wir Lehren für die Praxis ziehen, wollen wir an Hand einiger Beispiele Einblick in die quantitativen Verhältnisse gewinnen.

Beispiel 51. Der Ballon *O*, $V = 637$ cbm, Gewicht 232 kg, werde bei einer Übung in der Pfalz mit Leuchtgasfüllung als Fesselballon benutzt. Der Barometerstand betrage 750 mm; das Kabel wiege pro Meter 0,13 kg; die Gondel trage außer einem Beobachter, 75 kg schwer, noch 23 kg Ballast und Apparate. Welches ist die maximale Steighöhe bei Windstille? — Bei einem Barometerstand von 760 beträgt die Tragkraft der Füllung $637 \cdot 0{,}7 = 446$ kg; der niedrigere Barometerstand erniedrigt sie auf 440 kg. Die Formel 30 liefert also die Steighöhe

$$h = 8000 \frac{440 - 330}{440 + 8000 \cdot 0{,}13} = 595 \text{ m.}$$

Unter diesen Verhältnissen könnte der Ballon wohl als Fesselballon dienen. Es erhebe sich aber ein Wind von nur 5 m/sec. Der Querschnitt des Ballons ist 90 qm; nehmen wir an, der Ballon behalte auch im Winde seine Kugelgestalt bei, so ergibt sich der Winddruck (S. 77) $K = 0{,}9 \cdot \frac{1}{3} \cdot 90 \cdot 5^2 = 67{,}5$ kg, und die neue Steighöhe wird nach Formel 31)

$$h = \frac{1}{0{,}13}\left[\sqrt{0{,}13^2 \cdot 595^2 + 67{,}5^2} - 67{,}5\right] = 270 \text{ m.}$$

Seiner geringen Steigkraft wegen ist der Ballon schon bei dieser geringen Windstärke nicht mehr als Fesselballon verwendbar.

Füllen wir andererseits mit Wasserstoffgas, $T_0 = 1,2$ kg, und belasten die Füllung durch einen weiteren Beobachter, mehr Ballast und Apparate mit 450 kg, so ergibt sich bei Windstille eine maximale Steighöhe von 1360 m, die durch Wind von 5 resp. 10 m/sec. auf 940 resp. 400 m erniedrigt wird.

Will man den Ballon als Fesselballon benützen, so muß man schon bei mäßigen Windstärken verzichten, die größten, möglichen Steighöhen auszunützen, um dem Winddruck eine durch weniger Kabelgewichte verminderte Steigkraft gegenüberstellen zu können. Allein schon bei Windgeschwindigkeiten von 10 bis 12 m/sec., die ein moderner Lenkballon noch sicher überwindet, muß man erfahrungsgemäß darauf verzichten, einen Kugelballon als Fesselballon zu benützen. Im Gegensatz hierzu ist der Drachenballon noch bei Winden bis 20 m/sec. verwendungsfähig. Ebenfalls vom Volumen 630 cbm und mit einem Eigengewicht von 360 kg, wird er mit einer Mehrbelastung von 110 kg in Berlin (bei $b = 760$ mm) 1140, in München (bei $b = 716$ mm) 930 m maximale Höhe erreichen können. (Vom Gipfel der Zugspitze aus würde er noch 140 m steigen können.) Die Größe des Ballonettes (130 cbm) läßt diese Höhenunterschiede noch zu (darüber § 20); allein da man mit Wolkenschatten oder sonst geschwächter Einstrahlung zu rechnen hat, welche namentlich bei Windzug die Tragfähigkeit dieses Ballones konstanten Gasgewichts stark herabsetzen, wird man nur zu geringern Höhen steigen lassen, um selbst bei geringster Tragfähigkeit das abgelaufene Kabel sicher gehoben zu wissen.

Beispiel 52. Ein Ballon marschiert am Schlepptau; die Windgeschwindigkeit sei w Meter/Sekunden. Welches ist die Geschwindigkeit v des Ballones?

Der Wind trifft den Ballon mit einer Geschwindigkeit $(w - v)$ Meter/Sekunden und drückt denselben in horizontaler Richtung mit einer Kraft

$$K = R(w - v)^2 \text{ Kilogramm}; \; R = \frac{1}{3} \cdot 0{,}09 \cdot \frac{\pi D^2}{4};$$

diese Kraft muß gleich der Kraft k sein, die zur Überwindung der Reibung des niedergelegten Kabelstückes gegen die Erde erforderlich ist. Durch diese Gleichsetzung ergibt sich

$$v = w - \frac{6{,}5}{D}\sqrt{k} \text{ Meter/Sekunden.}$$

Das gibt für den 600 cbm Ballon $v = w - 0{,}6\sqrt{k}$ Meter/Sek.,
für den 1440 cbm Ballon $v = w - 0{,}45\sqrt{k}$ Meter/Sek.

Für Schlepptaue, wie sie in Gebrauch sind, fanden wir oben

beim Gleiten über Wiesen k und zu 25 kg; die Geschwindigkeiten der Ballone sind dann rund 3 resp. $2^1/_4$ m/sec. kleiner als die Windgeschwindigkeit. Steigt k auf 50 kg, so ist die Differenz $4^1/_4$ resp. 3 m/sec. In Wirklichkeit werden die Differenzen bedeutend geringer sein, denn der Wind trifft keinen kugelförmigen Ballon, sondern fängt sich in den Dallen des schlaffen Ballones. Der Faktor R kann leicht auf den doppelten Betrag steigen, so daß die berechneten Geschwindigkeitsdifferenzen rund 40% kleiner werden. *Es wird also das Schlepptau sehr kräftige Hemmung erfahren müssen, um die Geschwindigkeit eines Ballones nur um 2—3 m/sec. unter Windgeschwindigkeit zu halten.*

Beispiel 53. In welcher Höhe marschiert der Ballon am Schlepptau? Wir nehmen an, der niedergehende Ballon sei durch das Schlepptau bei Windstille abgefangen und schwebe in h Metern über der Erde. Erhebt sich nun ein immer stärker werdender Wind, so erniedrigt sich, solange das Schlepptau ruht, diese Höhe kontinuierlich, bis der wachsende Winddruck den Ballon zu schleppen vermag. Von diesem Augenblicke an bleibt die Höhe, bei gleicher Bodenbeschaffenheit, konstant; mit immer größerer Geschwindigkeit eilt der Ballon davon, in einer Höhe, die nur durch die Reibung des Schlepptaus bedingt ist. Diese Höhe exakt zu bestimmen ist verwickelt, falls wir, wie vielfach üblich, ein Schlepptau benützen, das aus zwei Teilen von ungleicher Beschaffenheit besteht, und Teile beiderlei Beschaffenheit hängen. Wir nehmen an, ein Schlepptau von 100 m Länge und 36 kg Gewicht bestehe aus einem 50 m langen Tau, 26 kg schwer, das durch ein dünneres, 50 m langes, 10 kg schweres Tau an den Ballon geknüpft ist. Es sollen sich gerade 50 m Tau niedergelegt haben, so daß der Ballon bei Windstille in 50 Meter Höhe schwebt. Marschiert der Ballon, so haben wir die neue Höhe h nach Formel 31 zu berechnen, wobei wir $p = \frac{10}{50} = 0{,}2$ kg zu setzen haben. So finden wir für

$$k = 25 \text{ kg}, \; h_1 = 10 \text{ Meter}$$
$$k = 50 \text{ kg}, \; h_1 = 5 \text{ Meter}.$$

Dies gewaltige Herabdrücken könnten wir nach Beispiel 51 erwarten. Erleidet ein Ballon von beliebiger Größe an *diesem* Tau eine Bremsung von 50 kg, etwa beim Fahren über Wald, so wird die Gondel tief in die Baumwipfel herabgedrückt. Über glatte Wiesen fährt der Ballon nur in 10 m Höhe.

Würden wir ein 100 m langes Tau von überall gleicher Stärke und 36 kg Gewicht benützt haben, so würden die 50 m ursprünglicher Höhe sich bei Wind auf 16 resp. 9 m erniedrigt haben. Auch hier könnte beim Fahren über Wald die Gondel in die Wipfel ein-

tauchen. Bestände das Tau aus 60 m 28 kg schweren und 40 m 8 kg schweren Stücken, und schleifen die 60 m, so würde die Fahrthöhe nur 6,5 resp. 5,5 m betragen! Daraus folgt: *Soll der Ballon am Schlepptau marschieren, so darf nur ein möglichst kurzes Stück desselben schleppen.* Ist das Stück, das der Ballon noch trägt, zu leicht, so kann ein starkes, rasches Anwachsen von k, etwa dadurch, daß eine Hecke das Tau schwierig durchgleiten läßt, die Gondel aufschlagen lassen, und zwar Aufprallen mit beinahe voller Windgeschwindigkeit (vgl. Beispiel 52). Ist dies Stück zu leicht, der Ballon zu sehr entlastet, so kommt es zur eigentlichen Schleppfahrt, die schon bei Winden von 2—3 m/sek. eintreten kann und unter allen Umständen vermieden werden muß. Hätten wir andererseits mit dem Tau von gleichmäßiger Beschaffenheit den Ballon in 70 m Höhe abgefangen, so würde er in 29 resp. 16,5 m Höhe marschieren.

Um Mißverständnissen vorzubeugen, wiederhole ich nochmals, daß diese Höhen unabhängig von der Windgeschwindigkeit, lediglich durch die Beschaffenheit des Terrains bedingt sind.

Beispiel 54. Wie vollzieht sich der Marsch über unebenem Terrain? Dieser Fall ist, falls wir von kleinen Unebenheiten, die sich nur in vermehrter Reibung geltend machen, absehen, theoretisch nur schwierig zu behandeln. Nehmen wir an, der Ballon trifft auf ein aufsteigendes Terrain. Eine vorliegende Untersuchung dieses Falles schließt fälschlicherweise folgendermaßen: Soll der Ballon mit dem ansteigenden Boden nicht kollidieren, so muß er höher kommen; die in höherer Lage verminderte Tragkraft muß durch weiteres Niederlegen vom Schlepptau ausgeglichen werden; die Geschwindigkeit des Ansteigens infolge dieser Ballastabgabe ist aber klein. Infolgedessen wird bei einigen beträchtlichen Winden und größerer Bodenerhebung die Fahrt am Schlepptau bald beendet sein. Hierbei läuft ein doppelter Irrtum unter. Der am Schlepptau marschierende Ballon ist in Praxis stets ein schlaffer Ballon, dessen Tragkraft unabhängig von der Höhe ist. Vermag der Ballon ein niedergelegtes Stück Schlepptau dem Winde folgend den Abhang hinaufzuziehen, was in einer Vergrößerung von k zur Geltung kommt, so behält er konstanten Abstand vom Erdboden bei. Ferner wehen die Winde in solchen Fällen nicht horizontal, sondern schmiegen sich in den untersten Schichten, in denen der Ballon schwimmt, der Terrainformation an. Diese ansteigenden Winde ermöglichen dem Ballon selbst kräftige und längere Terrainerhebungen zu überwinden; die Fahrtkurve wird die Terrainformation geschwächt wiedergeben.

Von großem theoretischen Interesse ist der praktisch häufig eintretende Fall, daß sich dem marschierenden Ballon ein plötz-

liches Hindernis, ein Waldrand, eine Mauer, ein Haus usw. entgegenstellt, welches der Ballon überragt. Eine Stelle des gehobenen Schlepptaus kommt dann mit der oberen Kante des Hindernisses in Berührung, und der Druck an dieser Stelle tritt dann als neue Kraft zu den drei Kräften, die sich vorher das Gleichgewicht hielten (Winddruck, Steigkraft, Seilspannung) hinzu; diese neue Kraft ermöglicht es, daß bei nicht zu schwachem Winde das bereits niedergelegte Stück des Schlepptaus wieder aufgenommen und auf das Hindernis hinaufbefördert wird. So wird es z. B. dem Ballon möglich, bereits niedergelegtes Tau über Häuser oder Wälder hinwegzuschleppen, falls die Windgeschwindigkeit einen gewissen Betrag übersteigt.

Haben wir es mit einem Hindernis zu tun, welches den Ballon überragt, etwa mit einer Felswand, so ist eine Kollision höchstens bei sehr schwachen Winden zu befürchten. Eine einigermaßen ausgeprägte Windströmung wird durch das Hindernis ebenfalls nach oben abgelenkt und hebt den Ballon über dasselbe hinweg. Die Tabelle der Steig- und Sinkgeschwindigkeiten S. 81 zeigt, daß überaus schwache Winde bereits stark heben können.

Namentlich im Hinblick auf die in Beispiel 53 erläuterten Verhältnisse ergibt sich, daß die Zusammensetzung des Schlepptaus aus zwei ungleich schweren Stücken auch ihre Nachteile hat. Das Schlepptau darf nicht zu schwer sein, um nicht bei günstigen Temperaturverhältnissen (vgl. § 17) zuviel unnötigen Ballast in Form von Schlepptau zu ergeben. Namentlich wird man im Winter mit leichterem Schlepptau auskommen, wie im Sommer. Dabei soll dasselbe nicht zu kurz sein, um genügend Abstand zwischen Ballon und Erde legen zu können, und das Abfangen soll rasch, auf kurzer Distanz, sich vollziehen. Diese Vorteile werden durch die Zusammensetzung des Taues erreicht, die bei Windstille auch voll zur Geltung kommen. Doch schon bei mäßigen Winden verwandeln sich diese Vorteile in Nachteile. Je schwereres Tau geschleppt wird, desto stärker drückt der Wind den Ballon, je leichteres Tau er trägt, desto *leichter* wird er niedergedrückt. Um diese Nachteile zu vermeiden, mache es sich der Führer zur Regel: *Soll am Schlepptau gefahren werden, so darf nur ein möglichst kurzes Stück desselben schleifen.*

§ 19. Die Fahrt.

Quidquid agis, prudenter agas, et respice finem.

Dem Ballonführer kann kein besserer Merkspruch eingeprägt werden. „Überlege jede Handlung und denke dabei stets an das Ende." D. h. an das Ende der Fahrt, die Landung.

Jede Ballonfahrt zerfällt naturgemäß in drei Abschnitte, Abfahrt, eigentliche Fahrt und Landung.

A. Die Abfahrt. Wir nehmen als selbstverständlich an, daß der Ballon in tadellosem Zustande und klaren Leinen seine Reise antreten kann. Bewundernd hängen vieler Blicke an dem „schön prall gefüllten" Ballon, mit Befriedigung wird die große eingenommene Ballastmenge notiert. Aber mit Unrecht. Eine Abfahrt mit prallem Ballon ist mit Nachteilen verbunden und sollte nur in zwei Fällen stattfinden. 1. Wenn zu speziellen Zwecken, etwa bei wissenschaftlichen Fahrten oder Zielfahrten, eine möglichst tiefe, erste Gleichgewichtslage verlangt wird. 2. Wenn böiger oder stärkerer Wind ein Abwiegen oder Ablassen eines schlaffen Ballones, in dessen loser Hülle sich fangend er weit stärker und unangenehmer sich geltend macht, verhindert.

In allen anderen Fällen bietet der schlaffe Ballon wesentliche Vorteile. Die größere Ballastmitnahme des prallen Ballones ist nur illusorisch und lästig; in der Prallhöhe des schlaffen angelangt, trägt er nicht mehr wie dieser. Alles Plus an Ballast muß während des vorausgehenden Aufstieges ausgeworfen werden, was die Aufmerksamkeit und Tätigkeit des Führers in Anspruch nimmt. Ohne Nachhilfe, die nur bei Temperaturumkehr und zu gering bemessener Steigkraft notwendig wird, steigt der schlaffe Ballon über seine Prallhöhe empor. Da sein Auftrieb bis zur Prallhöhe konstant bleibt, steigt er (vgl. § 17) ungefähr in halber Zeit zu dieser Höhe empor, wie bei praller Füllung; beinahe in halber Zeit steigt er über ein Niveau, unterhalb welchem Gebäude, Telegraphen oder Starkstromleitungen usw. ihm oder dem herabhängenden Schlepptau gefährlich werden können. Auch ist er während dieser Aufstiegsperiode gegen unvorhergesehene Überraschungen wesentlich geschützter wie ein Ballon, dessen Steigkraft sich kontinuierlich vermindert. Zu diesen Vorteilen, die allein schon ausschlaggebend sein sollten, kommt noch die wesentliche Gasersparnis, die namentlich im Felde oder im Festungskrieg von Bedeutung sein kann. Soll die Prallhöhe in 460 m relativer Höhe liegen, der mit Steigkraft hochgehende Ballon zwischen 500 und 600 m in seine erste Gleichgewichtslage kommen, so darf er nur zu 94% angefüllt werden (die zu 460 m gehörige Höhenzahl ist

1,06). Füllt man aus Flaschen oder in der Halle und nimmt an, daß in der Sonne das Gas sich nur um 10^0 erwärmt, so bedeutet dies bereits eine Volumvermehrung von 10.4$^0/_{00}$ = 4$^0/_0$, so daß in diesem Falle 10$^0/_0$ der Füllung erspart werden können, was bei zehn Fahrten eine elfte Fahrt umsonst ermöglicht. Dazu kommt noch, daß der pralle Ballon in der Sonne seine Hülle spannt (Vorsicht gegen Platzen, vgl. Beispiel Nr. 12); wird nach Abwiegen der Füllansatz aufgezogen, so zieht sich die Hülle zusammen. Dann tritt der Fall ein, daß trotz sorgfältigen Abwiegens der Ballon nicht hochgeht. Wenn immer möglich, sollte deshalb mit schlaffem Ballone abgefahren werden.

Ein schlimmer Feind des bereits hochgehenden Ballones sind böige Winde. Sie drücken ihn nieder, bringen ihn zum Sinken, selbst wenn sie in vollkommen horizontaler Richtung blasen. Denn infolge der Trägheit kann der Ballon nicht momentan ihre Geschwindigkeit annehmen. Den Ballon treffend drücken sie die Hülle ein, und ein entsprechendes Gasquantum entweicht. Entsteht im Ballon infolge des Windstoßes ein Überdruck von nur 1 mm Quecksilber, so entweicht das Leuchtgas durch den Füllansatz mit einer Geschwindigkeit von 20 m/sek. (vgl. Tabelle der Ausströmungsgeschwindigkeiten); durch einen Füllansatz von 35 cm Radius würden in der Sekunde 8 cbm entweichen. Bereits in drei Sekunden würde der Ballon eine Sinkkraft von 17 kg erhalten und niedergehen. Ein Wasserstoffballon aber würde die fünffache Sinkkraft erhalten! Weht der Wind stoßweise, so ist deshalb dem Ballone reichlich Steigkraft zu geben und mit aufgenommenem Schlepptau abzufahren, namentlich dann, wenn das Abwiegen in Windschatten eines Gebäudes geschieht.

Schlimme Streiche spielen dem Ballone öfters Fabrikschornsteine. Sie sind ihm viel gefährlicher, wie ausgedehnte Gebäude von gleicher Höhe. Denn an diesen wird der Wind nach oben abgelenkt und der Ballon dadurch über sie hinweggetragen. Eine Kollisionsgefahr ist also weit weniger zu befürchten. Auch hier zeigt sich der schlaffe Ballon überlegen, da er ungleich rascher an Höhe gewinnt.

Der meteorologisch geschulte Führer, der an klaren Wintertagen oder bei ruhigem Sommerwetter vor Sonnenaufgang oder nach Sonnenuntergang aufsteigt, wird sich erinnern, daß er mit größter Wahrscheinlichkeit in 300 m oder noch geringerer Höhe Temperaturumkehr antreffen wird. Er wird deshalb hinreichend Ballast bereithalten, um die unsichtbare Decke, an die er anstößt, zu durchbrechen (vgl. § 12). Wiederum ist der schlaffe Ballon im Vorteil; denn erhöht in der wärmeren Luft das Gas seine Temperatur zu gleicher Temperaturdifferenz gegen die

Umgebung wie vorher, so kann schließlich ohne Ballastausgabe durchgestoßen werden.

Ist der Ballon diesen Unannehmlichkeiten entronnen, und hat er in etwa 300—400 m eine Gleichgewichtslage erreicht, so beginnt ein neuer Abschnitt seiner Reise.

B. Die eigentliche Fahrt. Über den Grad, in welchem der Führer eines Ballones sein Fahrzeug beherrscht, finden sich nicht nur in Laienkreisen irrige Anschauungen. Daß ein Steuern in horizontaler Lage unmöglich ist, ist selbstverständlich. Hingegen wird dem Führer vielfach die Möglichkeit zugesprochen, sein Fahrzeug (den Freiballon) in vertikaler Richtung lenken und durch Aufsuchen günstiger Luftströmungen wenigstens in sehr beschränktem Maße Reiserichtung und Geschwindigkeit beeinflussen zu können. Dies ist vollkommener Irrtum. Auch die Steuerung in vertikaler Richtung entzieht sich, außer auf kurze Zeit, der Macht des Führers; es stehen ihm in jedem Augenblicke lediglich zwei Möglichkeiten offen, entweder am Schlepptau zu marschieren oder in einem Maße, *das nicht von seinem Belieben abhängt*, in höhere Schichten aufzusteigen.

Die Erörterung dieser Verhältnisse wird uns Aufschluß geben über eine weitere wichtige Frage. In seiner Halle kann ein gefüllter, aus gutem Material gebauter Ballon selbst bei geöffnetem Füllansatze lange Zeit stehen, ohne nennenswert an Tragkraft einzubüßen. Die Ballastmengen, die nötig sind, um deren Verminderung auszugleichen, stehen in keinem Verhältnisse zu den Ballastausgaben, die während der Fahrt in gleichen Zeiten selbst bei günstigsten Wind- und Strahlungsbedingungen erforderlich sind. Wechselseitiger Austausch von Gasmolekülen durch Hülle oder Füllansatz hindurch findet dann in kaum höherem Grade statt, wie beim Stehen in der Halle, eine Verschlechterung des Gases spielt hier, wie beim Lenkballon, nur eine untergeordnete Rolle. Die in der Regel vorhandene Ballastmenge würde tagelang zu deren Neutralisierung ausreichen; und doch geht eine Fahrt oft nach wenigen Stunden selbst bei sorgfältigster Führung zu Ende.

Beide Fragen finden ihre Beantwortung in dem Umstande, daß es unmöglich ist, mit einem schlaffen Ballone zu fahren, es sei denn, daß er auf einer kalten Luftschicht schwimmt. Mit einem schlaffen Ballone eine konstante Höhe einzuhalten, ist ebenso unmöglich, als eine vollkommene Kugel auf einem ebenen, reibungslosen Brette ruhig zu halten, und zwar aus demselben Grunde. Das Gleichgewicht wäre indifferent, die Stabilität Null; die minimalste Sink- oder Steigkraft bringt den Ballon herab ans Schlepptau oder hinauf in seine Prallhöhe. (Abgesehen von zufälliger Temperaturschichtung.)

Aber dem Führer stehen ja Hilfsmittel in Form von Ventil und Ballast zur Verfügung?

Die Wirkung einer Ballastausgabe haben wir bereits in § 17 ausführlich erläutert. Jede Ballastausgabe, die den Niedergang eines Ballones aufhebt, ist ein Überwerfen, es sie denn, die Sinkkraft desselben werde ganz oder zum Teil durch eine kalte Luftschicht neutralisiert, auf welcher er zum Schwimmen kommt. Ist durch Ballastabgabe die Sinkkraft exakt annulliert, so stoppt der Ballon keineswegs, sondern er geht weiter in die Tiefe mit abnehmender Geschwindigkeit; erst nach etwa 60 m ist dieselbe auf kaum mehr in Betracht kommende Werte reduziert; in fast allen Fällen liegen aber die Temperaturverhältnisse so, daß mit Tiefergehen sich neue Sinkkraft einstellt. Um den *Niedergang völlig* aufzuheben, muß stets etwas mehr Ballast ausgegeben werden, als zur Aufhebung der *Sinkkraft* nötig ist. Tritt infolge einer Ballastabgabe *vollständiger* Stillstand der Abwärtsbewegung ein, so kommt es nicht nur zum Stillstande (s. § 17); es hat bereits Überwerfen stattgefunden; der Ballon kehrt um und geht empor in seine neue Gleichgewichtshöhe, die stets höher liegt wie die Ausgangshöhe. Letztere wird überschritten, und unter Umständen sehr bedeutend, wenn die Ursache, die das Sinken bewirkte, inzwischen verschwand; denn der *ganze* ausgegebene Ballast ist dann überworfener Ballast; die Zunahme der Fahrthöhe ist dieselbe, als wäre er in der ursprünglichen Gleichgewichtslage ausgegeben worden. *Durch Ballastausgabe, die nicht durch zufällige Temperaturschichtung unterstützt wird, ist es nur möglich, den Fall entweder zu verlangsamen oder in einen Aufstieg umzuwandeln, nicht aber ihn genau zum Stillstand zu bringen. Jede Ballastausgabe, die den Niedergang ans Schlepptau verhindert, ist ein Überwerfen.*

Untersuchen wir weiter die Wirkung des Ventils. Ein *schlaffer* Ballon steige empor, und der Ventilzug soll ihn in einen Gleichgewichtszustand überführen. Das ist praktisch unmöglich; selbst wenn die entwichene Gasmenge die Steigkraft *zufällig* exakt ausgleichen würde, und der Ballon würde nach etwa 60 m Aufwärtsbewegung nur noch sehr geringe Steiggeschwindigkeit besitzen, so würden die niemals ganz fehlenden Strahlungs- und Temperaturschwankungen sofort wieder stören. Zu geringer Ventilzug würde die Prallhöhe nur noch höher legen, im andern Falle würde der Ballon seine frühere Lage nach unten überschreiten. Ballastausgabe wirkt zu schwach oder treibt den Ballon wieder über die gewünschte Lage empor. Abwechselnd Ventil und Ballast verwendend kann der Führer den schlaffen Ballon wohl einige Zeitlang um eine mittlere Lage herumpendeln lassen, geradeso wie es möglich ist, die oben erwähnte

Kugel durch geignetes Hin- und Herneigen der Unterlage am Herabrollen zu hindern. Allein der Gas- und Ballastverbrauch wäre so enorm, daß die Fahrt in ungleich kürzerer Zeit beendigt sein würde, als hätte der Führer als der Klügere dem in die Höhe strebenden Ballon nachgegeben.

Wie aber ist die Wirkung des Ventils auf einen steigenden, *prallen* Ballon? Dieser gibt Gas durch den Füllansatz ab, bis seine Steigkraft ausgeglichen ist. Wird während dessen Ventil gezogen, so ist der ganze Unterschied der, daß nun das Gas statt durch den Füllansatz durch das Ventil entweicht, oder bei schwachem Ventilzug durch beide. Wird das Ventil zeitig genug geschlossen, so geht der Ballon dahin, wohin er auch ohne Ventilzug gegangen wäre; im andern Falle geht er ans Schlepptau herab, falls er nicht durch Ballastabgabe in eine Gleichgewichtslage emporsteigt, die durch den Ventilzug erhöht worden ist.

Der Führer merke sich deshalb die goldene Regel: *Jeder Ventilzug erhöht die Gleichgewichtslage eines Ballones, falls nicht für die ganze Dauer der Weiterfahrt an das Schlepptau herabgegangen wird.* Er überlege es sich dreimal, ehe er zur Ventilleine greift, denn jeder Ventilzug bedeutet eine Abkürzung der Fahrtdauer. Ein Ventilzug kann z. B. nötig sein, wenn zwecks einer Rekognoszierung unter eine Wolkendecke heruntergegangen werden muß; erweist sich eine Landung als unnötig, so muß der Ausblick mit Erhöhung der Fahrkurve und entsprechender Abkürzung der Fahrt bezahlt werden. Ventilzug kann zweckmäßig sein, wenn eine Fahrt rasch beendet sein soll, so daß es nicht angezeigt ist, ein freiwilliges Fallen abzuwarten, oder wenn am Schlepptau marschiert werden soll. Diese Fälle werden aber verhältnismäßig selten sein. Es gibt nur einen Fall, wobei der Ventilgebrauch nicht nur zweckmäßig ist, sondern unter keinen Umständen unterlassen werden darf, wenn es nämlich gilt, bei beabsichtigter Landung die Wirkung des Überwerfens aufzuheben. Eine große Zahl von Fahrten verläuft ohne Benutzung des Ventils; in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle wird sein Gebrauch erst ganz am Schlusse der Fahrt durch Überwerfen veranlaßt.

Dem scheinbar paradoxen Satze, daß jeder Ventilzug bei fortgesetzter Fahrt in die Höhe führt, können wir einen andern, nicht minder merkwürdigen Satz an die Seite stellen. *Jede Belastung, die ein Ballon etwa durch Tau, Regen oder Schnee erleidet, steigert die Fahrthöhe.* Denn jede Mehrbelastung treibt den Ballon in die Tiefe und erfordert, falls die Landung vermieden werden soll, Ballastausgabe. Stoppt diese den Fall, so hat Überwerfen stattgefunden und die Fahrtkurve hebt sich. Sich häufende Niederschläge treiben, fortgesetztes Überwerfen veranlassend,

den Ballon empor, falls nicht bloß der Fall verlangsamt wird. Reicht der Ballast nicht aus, diese Mehrbelastung etwas überzukompensieren, so ist die Fahrt rasch beendet; im andern Falle hat eine dem Überwerfen entsprechende Erhöhung der Fahrtkurve stattgefunden und dementsprechend sich die Fahrdauer abgekürzt.

Die Mehrbelastung, die ein Ballon durch atmosphärische Niederschläge erleiden kann, ist schwierig abzuschätzen. Nimmt man an, daß diese in Form von Wasser, gleichmäßig über die obere Hälfte des Ballones verteilt, eine Schicht von $^1/_2$ mm Dicke bilden würden, so ergibt sich ihr Gewicht in Kilogrammen numerisch gleich dem Ballonquerschnitte in Quadratmetern. Der 600 cbm-Ballon würde so mit 85, der 1440 cbm-Ballon mit 150 kg beschwert werden. Darnach kann das Gewicht anderer Schichtdicken leicht angegeben werden. Über die mögliche Belastung durch Schnee fehlt jegliche Erfahrung.

Hören endlich Regen oder Schneefall auf, wird der Ballon durch Verdunsten wieder trocken, so wird die ganze abgegebene Ballastmenge überworfener Ballast, und die Fahrkurve steigt gewaltig an.

Und schließlich treibt jede Verminderung der Einstrahlung, jeder Wolkenschatten, der nicht rasch vorüberzieht, den Ballon in die Höhe. Der erste Effekt ist freilich Temperaturverminderung und Volumverkleinerung des Gases, welche ein Fallen mit außerordentlicher Sinkkraft bewirken. Wir wissen (§ 14), daß jede Verminderung der Gastemperatur eine Sinkkraft von $4^0/_{00}$ des verdrängten *Luftgewichtes* hervorruft. Die Größenordnung derselben prägt man sich am besten dem Gedächtnis ein, indem man sich merkt, daß in 2000 m Höhe ein Kubikmeter Luft ziemlich genau 1 kg wiegt. Ein 1000 cbm Ballon erfährt deshalb, unabhängig von der Art der Füllung, pro Grad Temperaturerniedrigung derselben eine Sinkkraft von rund 4 kg. Setzt ein Wolkenschatten die Gastemperatur um 10^0 herab, so ist der eintretende Fall an Ort und Stelle erst mit 40 kg zu bremsen. Jeder Führer wird wohl gewaltige Ballastopfer in unangenehmer Erinnerung haben, zu denen er durch Wolkenschatten gezwungen wurde. In diesen Fällen wird aber auch das unvermeidliche Überwerfen in höherem Maße sich geltend machen, und die Fahrtkurve steigt. Nimmt die Einstrahlung ihren ursprünglichen Wert wieder an, so wurde um die ganze, abgegebene Ballastmenge überworfen, und oft in außerordentlichem Maße erhöht sich die Gleichgewichtslage und kürzt sich die Fahrt ab. Jeder Wolkenschatten, dessen Verschwinden nicht abgewartet wird, treibt empor. Was sich aber beim Vorüberziehen eines Wolkenschattens abspielt, wiederholt sich in ungleich größerem Maßstabe im

Wechsel von Tag und Nacht. Die außerordentlichen Ballastopfer, die der Übergang vom Tag zur Nacht erfordert, erweisen sich mit aufgehender Sonne als notgedrungenes Überwerfen.

Wir sehen, daß jede Gleichgewichtsstörung, mag sie nach oben oder unten wirken, den Ballon schließlich emportreibt auf Kosten von Ballast und Fahrtdauer. Auch die Erhöhung der Gastemperatur durch Sonnenstrahlung erweist sich in dieser Beziehung als schädlich, sobald die Fahrt in den Tagesstunden abnehmender Einstrahlung fortgesetzt wird. Unter konstanten Temperatur- und Belastungsverhältnissen würde in ruhender Atmosphäre der Ballon in gleicher Höhe davonziehend nicht mehr an Tragkraft verlieren, wie bei ruhigem Stehen in seiner Halle. Jegliche Störung, die er erfährt, nötigt schließlich den Führer, zum Ballast zu greifen und dadurch die Fahrt abzukürzen. Die Fahrt ist bis auf die Schlußperiode, die Landung, spätestens beendet, sowie der Ballon eine maximale Höhe erreicht hat, die wir die *Endhöhe* nennen wollen.

Diese Endhöhe ist bei gegebener Ballongröße und Art der Füllung bestimmt durch die Menge des Ballastes, der bis zum Beginn der Landung ausgegeben werden kann, und durch die schließlichen Temperaturverhältnisse. Es wird nicht immer möglich sein, die Endhöhe auch wirklich zu erreichen. Belastung mit Regen oder Schnee, zu knapper Ballastvorrat bei langandauerndem Wolkenschatten, oder beim Fahren in die Nacht hinein, können die Fahrt schon früher beendigen. Die Endhöhe ergibt sich durch das Ballastwirkungsgesetz und Schätzung der Temperatur von Gas und Luft.

Beispiel 55. Wird der Ballon Pettenkofer in München unter normalen Verhältnissen, etwa $b = 715$ mm und $t = 15^0$ in der Halle gefüllt, so kann die Füllung mit rund 900 kg belastet werden. Können bis zum endgültigen Niedergange 140 kg Ballast ausgegeben werden, so berechnet sich die daraus resultierende Steigung zu rund 1350 m (§ 10); eine Lufttemperatur von 7^0 würde sie um 200 m erniedrigen (§ 12), aber eine Erwärmung des Leuchtgases um 40^0 über die Lufttemperatur um rund 1000 m steigern (§ 13), so daß eine Höhe über München von 2150 m oder 2670 m absolut sich als Endhöhe ergeben würde. Mit Erreichung dieser Höhe, gleichgültig ob in kürzerer oder längerer Zeit, ist die eigentliche Fahrt beendigt.

Die Kunst der Ballonführung besteht darin, in möglichst langsamer Steigung, nach möglichst langer Zeit erst diese Endhöhe zu erreichen. (Ein Fahren auf Höhe ist vom fahrtechnischen Standpunkt aus keine Kunst; ist die zur Verfügung stehende Ballastmenge ausgegeben, so hat der Ballon eben die mögliche Maximalhöhe

erreicht.) Die Geschicklichkeit der Führung kann lediglich im Fahren auf Dauer beurteilt werden; ein Fahren auf Distanz ist größtenteils vom Zufall abhängig, da dem Führer auf längere Zeit die Wahl der Fahrthöhe nicht freisteht, die Windverhältnisse in höheren Schichten nur durch Emporsteigen ermittelt werden können und ein darauf folgendes Zurückkehren in tiefere, günstigere Schichten auf die Dauer unmöglich ist.

Die Endhöhe ist bei gleicher Ballongröße und gleichem Ballastvorrat abhängig von der Art der Füllung und den Strahlungsverhältnissen. Um bei Beurteilung der „*Güte*“ einer Fahrt von diesen beiden Faktoren unabhängig zu werden, führt man statt des Ansteigens der Fahrtkurve zweckmäßig ein anderes Maß ein, den *durchschnittlichen Ballastverbrauch in der Zeiteinheit*, der Stunde. Je geringer derselbe, desto langsamer steigt jeder Ballon zu seiner Endhöhe empor. Durch diesen Maßstab sind wir auch in der Lage, Ballone mit Wasserstoff- und Leuchtgasfüllung in fahrtechnischer Beziehung miteinander zu vergleichen. In bezug auf Einstrahlung verhalten sich diese Ballone verschieden; allein dieser Umstand kommt jetzt für uns nicht in Betracht, da mit der daraus resultierenden Erhöhung der Fahrtkurve kein Ballastverbrauch verbunden ist. Dagegen wirkt alles, was in die Tiefe treibt, auf beide Ballone in absolut gleichem Betrage. Für Belastung durch Niederschläge ist es selbstverständlich, und Erniedrigung der Gastemperatur bewirkt pro Grad eine Sinkkraft von 4‰ des verdrängten Luftgewichts (§ 14). Die nötige Menge Bremsballast ist somit unabhängig von der Natur der Füllung; die Menge überworfenen Ballastes wird mit der ganzen ausgegebenen Ballastmenge zu- und abnehmen und wird durchschnittlich einen konstanten, von der Geschicklichkeit des Führers abhängigen Prozentsatz derselben ausmachen. Daraus folgt: *Auch der Ballastverbrauch pro Stunde ist, bei gleicher Ballongröße, unabhängig von der Art der Füllung, und bei gleicher Ballastmenge auch die Dauer der Fahrt.* In bezug auf die *Steigung* der Fahrkurve ergibt sich aber ein wesentlicher Unterschied. Bei gleichen Ballongrößen ist die Belastung bei Wasserstoffüllung, abgesehen von Temperatureinflüssen, 70% größer wie bei Leuchtgasfüllung. Nach dem Ballastwirkungsgesetz ist im ersten Falle die Erhöhung der Fahrkurve bei gleicher absoluter Ballastabgabe 70% kleiner, die Endhöhe ist 70% geringer wie diejenige, die beim Leuchtgasballon bei gleichem Ballastvorrat erreicht werden kann. Die Fahrtkurve wird beim Wasserstoffballon 70% langsamer ansteigen, ein großer, fahrtechnischer Vorteil, wenn es gilt, eine günstige Luftströmung auszunützen.

Diese Betrachtungen gelten, gleiche Ballongröße und gleiche verfügbare Ballastmengen vorausgesetzt. Beide Voraussetzungen

zugleich werden in Wirklichkeit kaum vorkommen. Die um 70% größere Tragkraft der Wasserstoffüllung wird nur in den seltensten Fällen durch Gewichte ausgeglichen, die nicht während der Fahrt ausgegeben werden können; der Ballastvorrat wird beträchtlich größer sein und, da der Ballastverbrauch pro Stunde derselbe ist, sich die Fahrtdauer proportional verlängern. In der Mehrzahl der Fälle aber wird die größere Tragkraft des Wasserstoffballones durch ein kleineres Ballonvolumen verwertet; die Bremsballastmenge, die bei gleicher Herabsetzung der Gastemperaturen erforderlich wird, ist diesem proportional. Derselbe Wolkenschatten gibt dem 600 cbm Wasserstoffballon etwa die halbe Sinkkraft, wie dem 1200 cbm Leuchtgasballon, die Bremsballastmengen verhalten sich hier etwa wie 1 : 2, und in gleichem Verhältnis stehen ungefähr die Mengen überworfenen Ballastes. So kommt eine außerordentliche Überlegenheit des Wasserstoffgases in fahrtechnischer Hinsicht zustande. In dem Maße, wie zu kleinerem Ballonvolumen gegriffen werden kann, sinkt der Ballastverbrauch pro Stunde, verlängert sich bei gleichem Ballastvorrat die Fahrtdauer und wird die ohnehin bei gleicher Ballongröße 70% geringere Steigung der Fahrtkurve nochmals verkleinert. Gegen den Willen des Führers wird sich im kleinen Wasserstoffballon die Fahrtkurve nur langsam heben.

Diese letzten Überlegungen gelten selbstverständlich auch bei Ballonen verschiedener Größe und gleicher Füllung.

Stellen wir noch kurz dies verschiedene Verhalten der Ballone bei Wasserstoff- oder Leuchtgasfüllung zusammen:

1. Steht derselbe Bruchteil der Tragkraft der Füllung in Form von Ballast zur Verfügung, so ist beim Fahren auf Höhe der Leuchtgasballon außerordentlich überlegen.

2. Bei Ballonen gleicher Größe ist der Ballastverbrauch pro Stunde derselbe; jedoch steigt die Fahrtkurve bei Wasserstoffüllung zirka 70% langsamer an.

3. Stehen in einem Wasserstoffballon vom Volumen V_1 und einem Leuchtgasballon vom Volumen V_2 Ballastmengen im Betrage $\mathfrak{B}_1$ und $\mathfrak{B}_2$ zur Verfügung, so verhalten sich die pro Stunde verbrauchten Ballastmengen wie $V_1 : V_2$ und die mögliche Fahrtdauer wie $V_2 \mathfrak{B}_1 : V_1 \mathfrak{B}_2$. Die nach 2. ohnehin ungleich geringere Steigung der Fahrtkurve wird nochmals im Verhältnis $V_1 : V_2$ herabgedrückt.

Die Steigung der Fahrtkurve beim Leuchtgasballon ist dabei so angesetzt, wie sie ohne Nutzberechnung der Einstrahlung lediglich durch Ballastausgabe bedingt ist.

Die Wichtigkeit, mit einer gegebenen Gasmasse möglichst lange Fahrtdauer zu erzielen, hat nach Hilfsmitteln suchen lassen,

den Ballastverbrauch und die Steigung der Fahrtkurve herabzusetzen. Dies kann prinzipiell auf zweierlei Weise geschehen: entweder können am Fahrzeug geeignete Mechanismen angebracht oder dem Führer instrumentelle Hilfsmittel gegeben werden, das augenblickliche Verhalten des Ballones sicher zu beurteilen.

Am sichersten könnte der gewünschte Zweck erreicht werden, wenn dem Ballone noch sogenannte „dynamische“ Tragkraft, etwa durch Hubschrauben, gegeben werden könnte. Eine Schraube, deren Hubkraft der Sinkkraft des niedergehenden Ballones gleichkäme, würde jede Ballastausgabe unnötig machen; es könnte mit schlaffem Ballone in beliebige Höhe gefahren werden. Versuche in dieser Hinsicht liegen nicht vor; so ausgerüstet würde der Ballon den Charakter der Einfachheit einbüßen und trotz seiner Vorteile wohl nur eine beschränktere Anwendungsmöglichkeit zulassen.

Nahe liegt der Gedanke, den Ballon mit einem Ballonet zu versehen. Wir werden die Theorie des Ballonettes im nächsten Paragraph entwickeln. Es wird sich zeigen, daß seine Verwendung wohl die Steigung der Fahrtkurve auf Null reduzieren kann, allein ohne die zugehörige Ersparnis an Ballast. In § 20 werden wir auch die Theorie des „Poeschel-Ringes“ geben, der ähnliche Zwecke anstrebt.

Dagegen verdient ein anderes Hilfsmittel, das bei außerordentlicher Einfachheit sehr wirksamen Erfolg verspricht, eingehend praktisch erprobt zu werden. Es besteht darin, die Oberfläche der Hülle durch Metallisierung möglichst reflektierend zu machen. In solcher Hülle wird sich das Gas unter Einfluß der Sonnenstrahlung weit weniger erwärmen; die Verhältnisse sind dieselben, als würden wir das Quecksilber in einer außen versilberten oder einer beschmutzten Thermometerkugel von der Sonne bescheinen lassen. Der Leuchtgasballon freilich würde sich die Einstrahlung nur in sehr vermindertem Maße nutzbar machen können und an Steighöhe einbüßen. Allein ungefähr in demselben Maße, wie die Gastemperatur sich weniger erhöht, nimmt auch der Temperatursturz ab, wenn die Strahlungszufuhr sich verkleinert. Würde etwa ein Wolkenschatten die vorhandene Temperaturdifferenz Gas und Luft auf die Hälfte reduzieren, und würde die Metallisierung eine Erhöhung der Gastemperatur nur auf halben Wert zulassen, so würde nur die Hälfte des Bremsballastes erforderlich sein, und ungefähr in demselben Grade der überworfene Ballast, der Ballastverbrauch pro Stunde und die Steigung der Fahrkurve abnehmen. Dazu kommt, daß das Strahlungsvermögen der Hülle ebenfalls vermindert, die bei Nachtfahrten eintretende Erniedrigung der

Gastemperatur unter Lufttemperatur verkleinert, die Ballastabgabe verringert und der Möglichkeit einer Belastung der Hülle durch Tau in hohem Maße ausgewichen wird. Versuche über Gewicht und Haltbarkeit der Metallisierung und namentlich den Grad, in welchem diese zu erwartenden Vorteile sich in Wirklichkeit einstellen, lassen Versuche äußerst wünschenswert erscheinen. Derselbe Zweck, Herabsetzung der Gastemperatur, könnte auch durch eine Schutzhülle, welche die obere Hälfte des Ballones in einigem Abstande umgibt, erreicht werden, vorausgesetzt, daß die Luft des Zwischenraumes genügend rasch erneuert wird. Ob sich diese nötige Ventilation durch einfache Hilfsmittel erreichen läßt, bleibt fraglich; die Gefahr der Taubildung bei Nacht wird wenig vermindert, der Ballon an Einfachheit verlieren und an Gewicht zunehmen. Derselbe Erfolg läßt sich durch Metallisierung weit einfacher und vermutlich viel wirksamer erreichen.

Ehe wir die den Führern zur Verfügung stehenden, instrumentellen Hilfsmittel besprechen, haben wir uns zu erinnern, daß alle unsere bisherigen Betrachtungen über Steighöhen, Ballastverbrauch, Ballastwirkung, Gleichgewichtsstörungen usw. eine in vertikaler Richtung unbewegte Atmosphäre zur Voraussetzung haben. Luftbewegungen mit vertikalen Komponenten werden aber sehr häufig vorhanden sein; und selbst bei kleinen Geschwindigkeiten werden diese, wie Tabelle der Steig- und Sinkgeschwindigkeiten S. 81 lehrt, mit großen Kräften den Ballon angreifen. Dabei ist der Effekt aufsteigender und absteigender Ströme verschieden. Der ohne Ballastausgabe in die Höhe geblasene Ballon gewinnt an Sinkkraft, die nach der Ballastformel leicht zu berechnen ist, und bei kleiner Geschwindigkeit wird es zu einem Gleichgewichtszustande kommen zwischen Sinkkraft und Luftdruck von unten. Einem abwärts gerichteten Luftstrome hingegen widersteht der schlaff werdende Ballon mit der Kraft Null, die schwächste abwärts gerichtete Luftbewegung wird den Ballon bis ans Schlepptau herabdrücken, um so mehr, da in solchen Fällen eine Bremsung durch Temperaturänderungen selten zu erwarten ist. Bildet sich über einem Gelände, das sich unter Einfluß der Sonnenstrahlung weniger erwärmt wie seine Umgebung, z. B. Seen, Flußläufen, sumpfigem Terrain, häufig auch Wäldern, absteigende Luftbewegung aus, die erfahrungsgemäß noch in beträchtliche Höhe emporreicht, so würde diese den nicht widerstandsfähigen Ballon ans Schlepptau bringen, falls nicht durch Ballast, der sich nachher über günstigem Terrain als überworfener Ballast kennzeichnet, entgegengewirkt wird. Es ist unmöglich, allgemein gültige Regeln aufzustellen, wie sich der Führer in Fällen vertikaler Luftbewegung

verhalten soll; einzig allein Erfahrung und ein gewisser Instinkt werden ihn richtig handeln lassen. Bei großen Geschwindigkeiten wird er in der Regel am besten tun, überhaupt nicht einzugreifen, weder durch Ventil noch Ballast; die Sink- und Steigkraft, die er dem Ballone geben kann, sind meistens nur klein gegen die Kräfte, die den Ballon angreifen; würde doch ein mit einer Geschwindigkeit von 10 m/sek. aufsteigender Luftstrom den prallen 1440 cbm Ballon mit einer Kraft von $0{,}09 \cdot \frac{1}{3} \cdot 150 \cdot 10^2 = 450$ kg emportreiben. Zu geringer Ventilzug hat lediglich die Wirkung, daß das Gas außer durch den Füllansatz noch durch das Ventil entweicht, ohne die Steighöhe herabzusetzen. Zu ausgiebige Ventilbenützung aber kann leicht den Gasverlust verhängnisvoll vergrößern. Treibt ein Luftstrom den Ballon in Höhen empor, in welchen er durch die noch zur Verfügung stehende Ballastmenge nicht mehr äquilibriert werden kann, so liegen eben unglückliche Umstände vor, gegen die jede Führung machtlos ist und deren Gefahren man nur durch vorsichtig bemessene Ballastreserve mildern kann. In den meisten Fällen dürfte es angezeigt sein, den emporgetriebenen Ballon durch Ballastabgabe noch zu erleichtern. Eine solche wird doch notwendig, wenn die Luftbewegung erlischt; der bereits erleichterte Ballon wird dann am raschesten abgefangen, und die totale Ballastabgabe am geringsten sein. Andererseits ist es angezeigt, bei stark niedergedrücktem Ballon mit Ballastabgabe möglichst lange zu warten, um großem Überwerfen vorzubeugen, falls die Luftbewegung erlischt. Reicht der Ballast nicht aus, den Ballon in den letzten 200—300 m abzufangen, so liegen fast stets Verhältnisse vor, gegen die der Führer machtlos ist.

Sind die Vertikalbewegungen nur schwach, so wird der Führer erst recht deren Ablauf abwarten. *Denn jeder Kubikmeter Gas, der durch das Ventil entweicht, jedes abgegebene Kilo Ballast können nutzlose Verschwendung sein, die nicht mehr rückgängig gemacht werden und sich später bitter rächen kann.* Sehr oft macht der Ballon, namentlich wenn er an der Grenze zweier ungleich temperierter Schichten schwimmt, eine wellenförmige Bewegung der Luft mit. Erlischt diese, so zieht der Ballon, eventuell durch etwas Ballast erleichtert, horizontal weiter. Jeder Versuch, den auf- und abgehenden Ballon durch Ventil und Ballast beruhigen zu wollen, würde nutzlose Erhöhung der Fahrtkurve und Abkürzung der Fahrtdauer zur Folge haben.

Ändert ein Ballon seine Höhenlage, so wird der Führer deshalb in erster Linie sich Klarheit verschaffen müssen, ob eine eigentliche Störung des Gleichgewichtes vorliegt oder nur vertikale Luftbewegung zur Wirkung gelangt. Die Angabe aller Instru-

mente, die nur Höhenänderungen infolge Änderung des Luftdruckes anzeigen, wie Barometer, Statoskop, Variometer lassen diese Frage unentschieden. Andererseits lassen ein Vertikalanemometer oder herausgeworfene Papierschnitzel nur eine Relativbewegung gegen die umgebende Luft erkennen. Diese beiden Klassen von Instrumenten wirken somit gänzlich verschieden. Die barometrischen Instrumente können stille stehen, die anderen reagieren. Das ist der Fall, wenn ein Ballon durch vertikale Luftbewegung abwärts oder aufwärts gedrückt wird mit einer Kraft, die seiner Steig- resp. Sinkkraft gleich ist. In diesem Falle haben wir es trotz unveränderter Höhe mit einem nicht ausäquilibrierten Ballone zu tun. Im Gegensatze hierzu können bei ruhig stehendem Anemometer die Barometer Höhenänderungen anzeigen; dann ist der Ballon aus einer Gleichgewichtslage heraus durch vertikale Winde in Bewegung gesetzt worden. (Durch Beobachtung beider Instrumente kann die Geschwindigkeit der letzteren ermittelt werden.) Ehe der Führer eingreift, verschaffe er sich Sicherheit, mit welcher Art von Störung er es zu tun hat. Nach unsern oben gegebenen Auseinandersetzungen wird er es unterlassen, einzugreifen, wenn Luftbewegung die Ursache ist, denn er wird nach Erlöschen derselben mit der geringsten Ballastmenge den Ballon beruhigen können. Jede Einwirkung, sei es durch Ventil oder Ballast, auf den in wellenförmiger Bahn dahinziehenden Ballon, sei es, daß dieser einer wellenförmigen Bewegung der Atmosphäre folgt, sei es, daß er „schwingt“ (siehe § 17, S. 86), würde nur eine Gleichgewichtsstörung bedeuten, die in vollem Maße zutage tritt, sobald die Luftströmung wieder horizontal wird oder die Schwingungen erlöschen. Der Führer hüte sich deshalb, den Anzeigen der barometrischen Instrumente gemäß sofort korrigieren zu wollen; bei Ausschlägen des so überaus empfindlichen Statoskopes sei er besonders vorsichtig. So wertvolle Dienste letzteres Instrument bei sachgemäßer Benutzung leisten kann, führt es den Führer leicht in Versuchung, unnötigerweise Ballast auszugeben.

Wir haben noch eine viel diskutierte Frage zu erörtern. Der Ballon erhalte Sinkkraft und gehe in die Tiefe. Soll der Führer möglichst zeitig oder möglichst spät den Bremsballast ausgeben, *vorausgesetzt, daß nicht zur Landung geschritten werden soll?* Kann das Verschwinden der störenden Ursache abgewartet werden, so wird selbstverständlich inzwischen keine Ballastausgabe erfolgen. Die Wirkung kleiner, vor der Sonne rasch vorüberziehender Wolken z. B. wird auf diese Weise ohne beträchtliches Überwerfen pariert werden können. Wie in anderen Fällen verfahren werden muß, machen wir uns klar an Hand der Fig. 4 (vgl. Fig. 2). Dabei nehmen wir an, was in der überwie-

genden Mehrzahl der Fälle eintreffen wird, daß die Abnahme der Tragkraft durch Verminderung der Gastemperatur verursacht wurde. Die Anpassung an andere Verhältnisse ist dann unmittelbar gegeben.

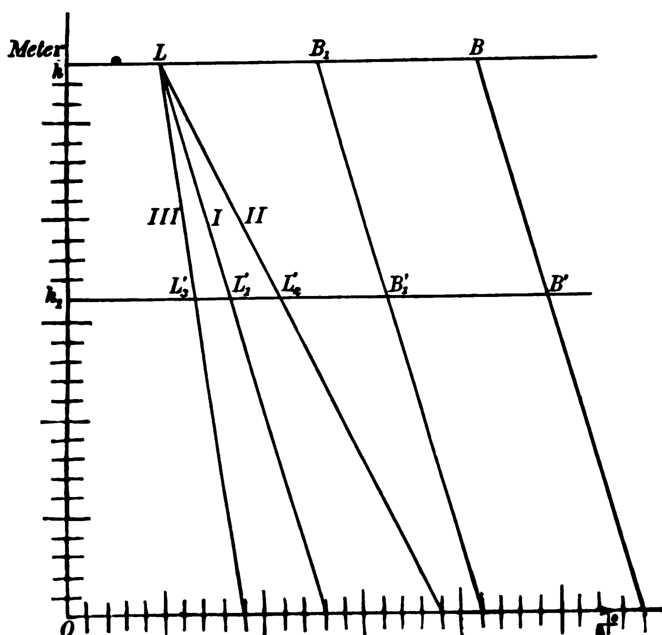


Fig. 4.

Der Ballon schwebe in der Höhe h; die Lufttemperatur sei L, die Gastemperatur B werde plötzlich auf B_1 herabgesetzt, wodurch der Ballon eine Sinkkraft proportional $B_1 B$ erfährt. Wir werden der Einfachheit wegen die Ballastmengen für Steig- und Sinkkräfte durch die Längen ausdrücken, denen sie proportional sind. Der Ballon geht also mit einer ursprünglichen Sinkkraft $B_1 B$ in die Tiefe; dabei erwärme sich das Gas in einem Maße, das durch die Gerade $B_1 B_1'$ gegeben sei (§ 16). Durch L und B legen wir die Geraden $L L_1'$ und $B B'$ parallel zu $B_1 B_1'$. In der Höhe h_1 ist die Gastemperatur B_1' geworden. Die Änderung der Lufttemperatur mit der Höhe werde durch eine der Geraden I, II, III dargestellt, je nachdem sie nach der Tiefe zu gleich, rascher oder langsamer zunimmt wie die Gastemperatur. In der Regel wird der Fall II vorliegen (§ 16). In der Höhe h_1 herrscht die Lufttemperatur L_2'; der Anteil der

Tragkraft, der aus dem Überschuß der Gas- gegen die Lufttemperatur resultiert und der in der Höhe h gleich LB_1 war, hat auf $L_2'B_1'$ abgenommen. Um den Ballon in der Höhe h_1 zu äquilibrieren, ist eine Menge Bremsballast $= B_1'B' + L_1'L_2'$ nötig, wie durch leichte Überlegung einzusehen. Da aber mit schlaffem Ballone nicht gefahren werden kann, muß der Ballon wieder in seine Prallhöhe h emporgebracht werden. Dazu genügt die geringste Steigkraft. Mit zunehmender Höhe vergrößert sich wieder der Temperaturunterschied Gas-Luft, und ist der Ballon mit der Temperatur B_1 wieder in der Höhe h angelangt, so ergibt sich unmittelbar aus der Figur, daß um die Ballastmenge $L_1'L_2'$ überworfen wurde. Zugleich lehrt ein Blick auf die Figur: In je tieferer Lage der Ballon abgefangen wird, desto größer ist die Ballastmenge $L_1'L_2'$, um die *notwendigerweise* überworfen werden muß. Sie ist praktisch gleich Null in unmittelbarer Nähe von h und die Bremsballastmenge hier gleich dem notwendigen Minimum B_1B. (Auch diese Menge wäre überworfener Ballast, wenn etwa die Sonne wieder durchbricht.) Wird in dem seltener vorkommenden Falle III der Ballon in der Höhe h_1 äquilibriert, so muß, wie die Figur lehrt, nur die Ballastmenge $B_1'B' - L_1'L_3'$ ausgegeben werden (da die Temperaturdifferenz Gas-Luft um $L_1'L_3'$ zugenommen hat). Jetzt ist die Menge überworfenen Ballastes nicht nur Null, sondern negativ. Denn um wieder zur Prallhöhe h emporzusteigen, muß die Ballastmenge $L_1'L_3'$ abgegeben werden. Es liegt hier einer jener mehrfach schon erwähnten Ausnahmefälle vor, wobei mit schlaffem Ballone einige Zeitlang gefahren werden kann; derselbe schwimmt zwar nicht auf einer sprungweise kalt werdenden Schicht, aber doch in einer Atmosphäre, die nach unten *relativ* gegen den Ballon stetig kälter wird. Jeder Führer kennt solche Schichten, die „gut tragen“. Damit ist die aufgestellte Frage gelöst. Liegen die Temperaturverhältnisse in der Atmosphäre wie im Falle II, und dies ist die Regel, so ist die Menge ausgegebenen und überworfenen Ballastes um so kleiner, je rascher die eintretende Sinkkraft ausgeglichen wird. Das Umgekehrte ist der Fall, wenn die Verhältnisse wie unter III vorliegen. Hier wird überhaupt nicht überworfen, und die auszugebende Ballastmenge, durch die der Ballon wieder in seine Höhe h zurückgebracht wird, ist gleich dem notwendigen Mindestmaß B_1B. (Ohne Ballastausgabe kann, etwa an kalten, klaren Wintertagen, der Ballon auf kalten Bodenschichten abgefangen werden.) Im Grenzfalle I ist der Ort der Ballastabgabe gleichgültig. Ist der Führer über die Temperaturverteilung im Unklaren, so wird er gut tun, Fall II anzunehmen, der in Wirklichkeit auch ungleich häufiger vorliegt, und möglichst

rasch den sinkenden Ballon abfangen; einem möglichen Überwerfen ist so am sichersten vorgebeugt. Wir sehen an diesem Beispiele wiederum, daß eine allen Ansprüchen gerecht werdende Ballonführung nur möglich ist, wenn der Führer während des Aufstieges durch Temperaturmessungen sich Aufschluß über die Temperaturverteilung in der Atmosphäre verschafft hat.

C. *Die Landung.* Die eigentliche Fahrt ist beendet, sobald der Ballast bis auf die zur Landung reservierte Menge aufgebraucht ist. Ist diese zu klein bemessen, so verliert der Führer gerade dann, wenn sie am notwendigsten wird, die Herrschaft über sein Fahrzeug vollständig, und die Landung selbst wird ein Spiel des Zufalls. Nur bei Kenntnis der Temperaturverteilung in der Atmosphäre kann sie richtig abgeschätzt werden. Führt der Fall den Ballon unter eine Wolkendecke hinab, so gewinnt er in deren Schatten Sinkkraft, die nur durch eine entsprechend vergrößerte Ballastreserve aufgehoben werden kann. Mit der allergrößten Vorsicht aber hat der Führer Ballast zu reservieren, wenn an heißen Sommertagen in den Nachmittagsstunden gelandet werden soll. Erfahrungsgemäß werden dann die Ballastmengen leicht unterschätzt. Heiße Bodenschichten können bei einem Ballon mittlerer Größe leicht 100 kg Bremsballast erfordern. Der Führer erinnere sich daran (vgl. oben S. 101), daß pro 1000 cbm Ballonvolumen jeder Grad, um den sich die Temperaturdifferenz Gas-Luft beim Niedergang verkleinert, rund 4 kg Bremsballast erforderlich macht.

Ist der Ballon zur Landung hergerichtet, d. h. das Schlepptau ausgelegt, die Leinen klar und bequem erreichbar, aller Ballast an der Schleifseite des Korbes zum Auswurf bereit untergebracht, alle schweren, beweglichen Gegenstände fest verstaut, so wird in der Regel der Führer abwarten, bis irgend eine Gleichgewichtsstörung den Fall einleitet. In Ausnahmefällen, wenn es gilt, möglichst rasch die Fahrt zu beenden, etwa bei eintretender Gewittersituation, oder wenn eine bestimmte Grenzlinie nicht überschritten werden soll, wird dem Ballone durch kurzen Ventilzug eine geringe Sinkkraft gegeben. Soll der Ballon, ohne noch am Schlepptau zu marschieren, möglichst nahe einem bestimmten Orte, etwa einer Eisenbahnlinie, landen, so wird der Führer in einer gewissen Distanz D den Fall einleiten, die durch die Ballonhöhe h, Sinkgeschwindigkeit v und Windstärke w bedingt ist, derart, daß die Zeit $\frac{h}{v}$, die der Ballon zum Niedergange braucht, gleich ist der Zeit $\frac{D}{w}$, die er braucht, um die Distanz D zurückzulegen. Daraus bestimmt sich $D = h\frac{w}{v}$. Da wir unter normalen Verhältnissen für v

etwa 3 m/sek. annehmen können, ergibt sich, wie das folgende Beispiel zeigt, eine bequeme Gedächtnisregel.

Beispiel 56. Ein Ballon fährt in einer Höhe von 2500 m mit einer Geschwindigkeit von 35 km/Stunde. Wieweit diesseits eines zu erreichenden Zieles muß der Fall beginnen? Wir nehmen eine mittlere Fallgeschwindigkeit $v = 3$ m/sek. an, die einzuhalten unter normalen Verhältnissen der Führer in seiner Gewalt hat. 3 m/sek. sind mit genügender Genauigkeit 10 km/Stunde. Drücken wir h auch in Kilometern aus, so erhalten wir die Distanz $D = 2{,}5 \cdot \frac{35}{10} = 8^3/_4$ km; nach 15 Minuten ist der Ballon am Schlepptau. Allgemein haben wir die Regel: *Um D zu finden, multipliziere man die Ballonhöhe in Kilometern mit dem 10. Teil der Windgeschwindigkeit in Kilometern.* Dabei ist, was nur selten zutrifft, die Windgeschwindigkeit unabhängig von der Höhe angenommen worden. Allein der Führer wird während des Aufstieges ein Bild der Verteilung gewonnen haben und demnach das berechnete D, das ja nur einen Anhaltspunkt geben soll, modifizieren können.

Ist der Fall eingeleitet, so ist der weitere Verlauf abhängig von den Temperaturverhältnissen der zu durchfallenden Schichten, wie auf Seite 72 auseinandergesetzt wurde. Liegt der Fall III vor, daß die Luft stetig oder sprungweise relativ kälter wird wie die Füllung, so kann der Ballon nur mit Hilfe des Ventils heruntergebracht werden. Da diese Verhältnisse meistens nur bei ruhiger Atmosphäre vorliegen, bieten sie der Führung keine Schwierigkeiten. Im anderen Falle, der die Regel ist, nimmt die Sinkkraft zu. Wann soll der Führer durch Ballastausgabe eingreifen? Wir haben oben Seite 110 gezeigt, daß, falls Fortsetzung der Fahrt beabsichtigt ist, die auszugebende Ballastmenge am kleinsten ist, wenn sie möglichst bald ausgegeben wird. Soll aber gelandet werden, so ist die auszugebende Ballastmenge lediglich bedingt durch die Tragkraft an der Erdoberfläche und deshalb gleich, ob sie während des Abstieges teilweise oder erst am Schlusse als Ganzes ausgegeben wird. Ein gewandter Führer wird unter Umständen letzteres vorziehen, namentlich dann, wenn möglichst bald gelandet sein soll. Jede mögliche Sinkgeschwindigkeit ist etwa 80 m nach Ausgabe des Bremsballastes auf $^1/_{50}$ ihres Wertes herabgesetzt worden; gelingt es in den untersten 200 bis 300 m nicht mehr den Ballon abzufangen, so ist die zur Verfügung stehende Ballastmenge zu klein und der Endeffekt derselbe, wie wenn der Ballon mit bereits verminderter Geschwindigkeit in diese Endzone eingetreten wäre. Allein um einem Überwerfen nach Möglichkeit vorzubeugen und um die Aufmerksamkeit des Führers in den letzten, kritischen Minuten nicht zu sehr

durch Ballastausgabe abzulenken, erscheint es angezeigter, mit Ballastabgabe einzugreifen, sobald die Sinkgeschwindigkeit einen gewissen Wert, etwa $2^1/_2$—3 m überschreitet, was durch Beobachtung von Papierschnitzeln, durch ein Variometer oder Barometer (der Ballon soll 150 m nicht in merklich kürzerer Zeit wie 1 Minute durchfallen) leicht festgestellt werden kann. Die Sinkkraft wird dann (vgl. Tabelle S. 81) nie größer als das Gewicht des Schlepptaues. Nach welchem Modus verfahren wird, immer bedenke der Führer an ruhigen, heißen Sommertagen, daß ganz am Schlusse verhältnismäßig niedere, aber warme Bodenschichten noch unliebsame Überraschungen bringen können.

In der Mehrzahl der Fälle vollzieht sich eine vorsichtige Landung so, daß schließlich der Ballon durch Unterstützung des Schlepptaues abgefangen wird. *Wir stehen vor der Frage, soll dies möglichst hoch oder möglichst nahe am Erdboden geschehen.* Dies hängt ganz davon ab, wie der Führer weiterhin zu handeln beabsichtigt. Soll der Ballon noch eine Strecke am Schlepptau marschieren, etwa um günstigeres Landungsterrain zu bekommen oder eine Bahnlinie zu erreichen, so muß möglichst hoch abgefangen werden. Wir verweisen deswegen auf das Seite 93 Auseinandergesetzte. Ein Marsch am Schlepptau nahe der Erdoberfläche muß vermieden werden; je näher, desto stärker wird bei vermehrter Reibung des Taues am Erdboden der Ballon herabgedrückt und desto mehr wächst die Gefahr des Aufstoßens und der Schleppfahrt. Soll aber gleich gelandet werden, so wird eine geringe Höhe angezeigt sein, falls der Führer es nicht vorzieht, überhaupt keine Gleichgewichtslage mehr zuzulassen, sondern, eventuell durch Unterstützung des Ventils, gleich ganz herabzugehen und zu reißen. Namentlich, wenn in Fahrtrichtung Gebäude, Telegraphen- und Starkstromleitungen drohen, wird letzteres Verfahren einzuschlagen sein. *Der Führer werde sich also bei Zeiten klar, wie er die schließliche Landung vollziehen will.*

In diesem letzten Stadium der Landung, namentlich dann, wenn der Führer große Fallgeschwindigkeiten zuließ und dadurch zu beträchtlicher Ballastausgabe genötigt wurde, kann es, selbst wenn das Schlepptau sich bereits niederlegte, zu so starkem Überwerfen kommen, daß das ganze Stück Tau aufgenommen wird und der Ballon wieder hoch geht. Dann tritt einer jener Ausnahmefälle ein, in denen Benutzung des Ventils dringendste Notwendigkeit ist. Unter keinen Umständen darf der Ballon wieder hoch gehen (er würde seine frühere Prallhöhe weit übersteigen), es sei denn bei einem Ballastvorrat, der eine zweite vollständig durchgeführte Landung und eventuelle Weiterfahrt zu einem anderen, geeigneten Landungsterrain gestattet. Ist aber, was meistens der Fall sein wird,

der Ballast ausgefahren, so muß ein Hochgehen vermieden und die endgültige Landung unter allen Umständen erzwungen werden.

§ 20. Das Ballonet und der Poeschel-Ring.

Unsere bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf zwei in fahrtechnischer Beziehung gänzlich verschiedene Ballontypen:

A. Den Ballon konstanten Gasvolumens und variabeln Gasgewichtes.

B. Den Ballon konstanten Gasgewichtes und variabeln Gasvolumens.

Es sind noch zwei weitere Typen möglich;

C. Der Ballon konstanten Gasvolumens und konstanten Gasgewichtes.

D. Der Ballon variabeln Gasvolumens und variabeln Gasgewichtes.

Wir können sie bauen mit Benützung eines *Ballonettes.*

Das Ballonet ist ein Luftsack, dessen Volumen v durch Luftzufuhr geändert werden kann, im Inneren der Ballonhülle, die ein konstantes Volumen V umschließt, derart angebracht, daß dem Füllgase der Raum $V - v$ zur Verfügung steht.

Dabei verfügt man noch über zwei Möglichkeiten. Es kann der Gasraum $V - v$ von der umgebenden Atmosphäre hermetisch abgeschlossen sein, das gibt den Typus C; oder er steht mit dieser durch ein Ventil, das sich unter geringem Überdrucke (der unter Umständen Null sein kann), öffnet, in Verbindung, dies gibt den Typus D, der die Typen A und B als Ganzfülle umschließt.

Der Ballontypus C bietet zwei außerordentliche Vorteile; erstens schwimmt er in stabilem Gleichgewicht, und zweitens ist er gegen Strahlung vollständig unempfindlich. Da derselbe bei konstantem Gewicht ein konstantes Luftvolumen verdrängt, würde er, wie eine leichte Überlegung zeigt, aus seiner Gleichgewichtslage nach oben oder unten verschoben, wieder in diese zurückkehren. Er würde also wie der pralle Freiballon nur durch eine endliche Kraft gehoben und im Gegensatz zum sinkenden, schlaffen Ballone nur durch eine endliche Kraft um ein endliches Stück herabgedrückt werden können. Da die Temperaturänderung des Füllgases ohne Änderung auf sein Gewicht und Volumen ist, kann ihn Strahlung nicht beeinflussen. Allein dies ideale Fahrzeug ist, wie bereits sein Erfinder Meusnier, dessen souveräne, geistige Beherrschung aller Probleme der Luftschiffahrt nicht hoch genug geschätzt und bewundert werden kann, zeigte, in Anbetracht der zu geringen Festigkeit der Ballonstoffe zu praktischer Verwendung

nicht herstellbar. Eine geschlossene Hülle, mit Gas gefüllt, der durch Aufblasen des Ballonettes ein größerer Druck wie derjenige der umgebenden Atmosphäre gegeben wird, würde einen solchen Ballon repräsentieren; allein das Höhen-, wie das Temperaturintervall, innerhalb welcher er seine charakteristischen Eigenschaften bewahrt, ist allzu gering. Emporsteigend würde er sich verhalten wie ein praller Freiballon mit zugebundenem Füllansatz und (vgl. § 4) bereits in einer Höhe von einigen Hundert Metern platzen. Steht das Gas unter einem Überdrucke von etwa 50 mm Wasser (50 kg/m²), und bedenken wir, daß in den Höhen, die hier in Betracht kommen, einer vertikalen Verschiebung um 1 m eine Änderung des Luftdruckes von etwa 1 kg/m $\left(\text{genau } \frac{p \text{ Kilogramm/meter}^2}{8000}\right)$ entspricht, so würde bereits beim Sinken um etwa 50 m der innere Überdruck kompensiert und der Ballon schlaff werden. Da andererseits 1^0 Temperatur den Druck um $4\,^0/_{00}$ ändert, so würde, wenn der Gasdruck 10000 kg/m² (etwas weniger wie 1 Atmosphäre) beträgt, 1^0 Temperaturerniedrigung den Druck um 40 kg/m herabsetzen, 2^0 Erniedrigung den Ballon bereits schlaff machen, wenige Grade Erhöhung denselben zum Platzen bringen.

Es kann, um mannigfach verbreiteten Irrtümern hier und im folgenden vorzubeugen, nicht genug betont werden, daß zur Berechnung der Tragkraft eines mit Ballonet versehenen Ballones lediglich das Gasvolumen $V - v$ in Ansatz zu bringen ist; das Ballonetvolumen v kommt dabei, wie auch bei Aufstellung der Bewegungsgleichungen, nicht in Betracht; verschiebt sich der Ballon, so verschiebt sich in der umgebenden Atmosphäre eine der in v eingeschlossenen gleiche Luftmasse im entgegengesetzten Sinne. Es ist deshalb gänzlich verfehlt, die in das Ballonet eingeführte Luft als Luftballast, der den Ballon beschwert, aufzufassen. Dies wäre nur zulässig, falls der Luft im Ballonette eine Dichte gegeben werden kann, welche wesentlich von der Dichte der den Ballon umgebenden Luft verschieden ist. Dies ist aber in Anbetracht der Stoffestigkeit unmöglich. Nehmen wir den Ballon etwa in 1000 m Höhe schwebend an, bei einem Luftdrucke von 660 mm Quecksilber, und würden wir in ein Ballonet von 300 cbm Fassungsvermögen noch weitere 10 cbm Luft, also etwa 10 kg, einpumpen, so würde der Druck in demselben um $^1/_{30}$, also um 22 mm Quecksilber = 300 kg/qm steigen, was auf die Dauer keinem Ballonstoff zugemutet werden kann. Nimmt man aber den Stoff als ausdehnbar an, so kommt es überhaupt nicht zu dieser Dichtesteigerung. Für alle in Betracht kommenden Anwendungen kann von einem Dichteunter-

schied zwischen Ballonetluft und umgebender Luft abgesehen und von einem Luftballaste nicht gesprochen werden.

Das Ballonet wird heutzutage fast ausschließlich verwendet, um einer biegsamen Hülle von konstantem Volumen durch inneren Überdruck eine gewisse Starrheit zu geben; wir werden diesen Mechanismus im nächsten Paragraphen erörtern. In seltenen Fällen wird auch noch ein Freiballon auf geeignete Weise mit einem Ballonet versehen; dies gibt den eigentlichen Ballon vom Typus D, den wir nun näher betrachten werden.

Das Ballonet wird in diesem Falle am zweckmäßigsten so hergestellt, daß zwischen 2 unterhalb des Ballonäquators gelegenen Parallelkreisen die Hülle verdoppelt wird, so daß ein abgeschlossenes, ringförmiges Gebilde entsteht, dessen Volumen v durch Einblasen von Luft von Null bis zu einem gewissen Maximalwerte nach Belieben geändert werden kann. Zu diesem Zweck steht dieser Raum durch einen Schlauch, der eng gedrosselt oder ganz verschlossen werden kann, mit einem Ventilator in Verbindung. Der eigentliche Füllansatz des Ballones kann offen sein; zweckmäßig verschließt man ihn durch ein Ventil, das sich unter dem sehr geringen Überdruck von wenig Millimetern Wasser (etwa 10 mm) öffnet. Dem Gase steht das Volumen V (konstant) — v (variabel) zur Verfügung.

Vor allem ist klar, daß durch ein Ballonet das Ventil ersetzt werden kann; statt das Gas durch das Ventil entweichen zu lassen, kann es durch Aufblasen des Ballonettes durch den Füllansatz entfernt werden. Dies Verfahren hat den Vorteil, daß der Ballon Gas abgibt, ohne schlaff zu werden. Die Arbeit, die der Ventilator dabei zu leisten hat, ist leicht zu berechnen. Denn füllen wir das Ballonet allmählich an, so ist klar, daß sich im Inneren der Ballonhülle das Füllgas und die Ballonetluft anordnen werden wie zwei Flüssigkeiten von ungleichen spezifischen Gewichten. Die schwerere Luft lagert sich so tief, als es die Wandung des Ballonettes zuläßt (deshalb Vorsicht bei Konstruktion des Ballonettes, daß dadurch nicht der Füllansatz verdeckt wird!), und reicht sie bis zu einer Höhe h über der Öffnung des Füllansatzes empor (allgemein über die untere Gasgrenze), so grenzt sie hier, falls wir vom Gewicht der trennenden Stofflage absehen, in einer horizontalen Trennungsfläche an das darüber liegende Gas an. In diesem Niveau ist deshalb der Druck der Ballonetluft gleich dem Gasdruck. Da dieser (siehe § 4) um $h\mathrm{T}$ größer ist wie der Atmosphärendruck im gleichen Niveau, so ist $h\mathrm{T}$ auch der Überdruck im Ballonette über die Atmosphäre in diesem Niveau. Gehen wir einerseits im Ballonette und seinem Füllschlauche, anderseits in der das Ballonet umgebenden Atmosphäre um gleiche Strecken tiefer, so steigen die Drucke um

gleiche Beträge, da wir die geringen Dichteunterschiede von Ballonetluft und umgebender Luft vernachlässigen können. Daraus folgt: *An allen Stellen des Ballonettes und seines Füllschlauches ist der innere Überdruck gegen die umgebende Luft konstant gleich* $h\mathrm{T}$ *Kilogramm/Meter*^{2}.

Er nimmt zu in dem Maße, wie die innere Ballonwandung sich hebt. Da h nur wenige Meter, T für Wasserstoff $\frac{1,2}{n}$, für Leuchtgas $\frac{0,7}{n}$ kg/cbm beträgt (n die Höhenzahl), sehen wir, daß der Ventilator im Maximum gegen einen Überdruck von wenig Millimetern Wasser zu arbeiten hat. Da ferner ein 1440 cbm Ballon, mit 3 m/sek. fallend, sein Gasvolumen pro Sekunde um rund $^1/_2$ cbm verkleinert (beim Fall durch 80 m um 1 %), wird ein Handventilator zum Betrieb dieses Ballonettes ausreichend sein. Da ferner Ballonet und Füllschlauch unter Überdruck stehen, wird bei abgestelltem Ventilator die Ballonetluft abfließen mit einer Geschwindigkeit, die wir durch Drosselung des Schlauches regulieren können; das Füllgas zieht sich dementsprechend in die Höhe, den freigewordenen Raum einnehmend. Steigt der Ballon, so können wir ihn deshalb vor Gasverlust bewahren, indem wir die Ballonetluft entsprechend abfließen lassen; ja wir können dadurch innerhalb gewisser Grenzen die Steiggeschwindigkeit durch die Drosselung bestimmen, namentlich wenn, um Gasverlusten vorzubeugen, der Füllansatz durch ein Ventil verschlossen wird, das sich bei wenig Millimetern Wasser Überdruck öffnet. Durch ein Ballonet kann also nicht nur, wie wir gleich sehen werden, die Höhe, sondern auch die Steiggeschwindigkeit bestimmt werden.

Mit Hilfe dieses Ballonettes können wir einen schlaffen Freiballon in einen prallen umwandeln, und dadurch kommt derselbe zu seiner eigentlichen Bestimmung.

Gesetzt ein Freiballon vom Volumen V geht aus einer Gleichgewichtslage in die Tiefe und soll nicht ans Schlepptau, so muß zum Abfangen desselben eine Kleinigkeit überworfen werden, und derselbe kehrt wieder mindestens in die Ausgangslage zurück.

Ist aber zur Zeit des Abfangens das Gas auf das Volumen $V - v$ zusammengeschrumpft, und blasen wir nun das Ballonet zum Volumen v auf, seinen Füllschlauch dann verschließend, so steht dem Gase weiterhin nur noch das Volumen $V - v$ zur Verfügung; wir haben also den Ballon vom Volumen V in einen Ballon von einem neuen, konstanten Volumen $V - v$ umgewandelt. Er kehrt nicht mehr in seine Ausgangslage zurück, denn die Abfangshöhe ist zugleich die neue Prallhöhe; und selbst das

Überschreiten dieser durch ein vorausgegangenes Überwerfen kann verhütet werden, indem das Ballonet etwas über das Volumen v aufgeblasen wird; dies ist ein Ventilziehen ohne Schlaffwerden. Wir sehen aber auch, daß das Ballonet vom Maximalvolumen v nur in einem beschränkten Höhenintervall wirksam ist; denn entspricht letzterem ein Druckintervall, durch welches das Gas vom Volumen V stärker komprimiert wird, also auf $V - v$, so reicht das Ballonet nicht mehr aus, einen *prallen* Ballon vom Volumen $V - v$ zu schaffen. Wie die Ballonetgröße bestimmt wird, soll in einem Beispiel gezeigt werden.

Beispiel 57. Mit welchem Fassungsvermögen v muß ein Ballonet gebaut werden, das in einem Ballon vom Volumen V durch ein Höhenintervall von h Meter hindurch wirksam sein soll? Wir suchen in der Tabelle der Höhenzahlen das zu h gehörige n. Füllt das Gas das Volumen V vollständig an, und sinkt der Ballon um h Meter in die Tiefe, so wird das Gas auf ein Volumen $V - v = \frac{V}{n}$ zusammengepreßt. Daraus ergibt sich das Ballonetvolumen

$$v = \frac{n - 1}{n} V.$$

Ist das Höhenintervall z. B. 2000 m, so ist $n = 1{,}284$, $\frac{n - 1}{n} = 0{,}221$; das Ballonet eines Ballones von 1440 cbm müßte $0{,}221 \cdot 1440 = 320$ cbm Fassungsvermögen haben. Wir können dies auch den Tafeln entnehmen. Gehen wir von Volumen $V = 1440$ cbm horizontal zur Höhenlinie 2000, dann senkrecht herunter zur Höhenlinie Null, so finden wir hier ein Endvolumen des Gases von 1120 cbm; das gibt ein Ballonetvolumen von 320 cbm. Da zu gleichen Höhenintervallen gleiche Höhenzahlen (Druckverhältnisse) gehören, so kann dies Ballonet benützt werden, wenn der Ballon von 4000 auf 2000 m oder von 3000 auf 1000 m oder von 2000 auf 0 m sinkt; bei einem Fall von 3000 m auf 0 m aber würde das Volumen 1440 cbm auf $\frac{1440}{1{,}456} = 990$ cbm verkleinert, und das Ballonet sich um 130 cbm zu klein erweisen.

Wir geben folgende kleine Tabelle der Ballonetgrößen in Prozenten des Maximalfassungsvermögens der Ballonhülle. Dies Höhenintervall ist praktisch gleich der maximalen *relativen* Steighöhe.

Tabelle der Ballonetgrößen.

Maximale relative Steighöhe	Ballonetgröße
500 m	6%
1000 „	12 „
1500 „	17 „
2000 „	22 „
2500 „	27 „
3000 „	31 „
4000 „	39 „
5540 „	50 „

In Wirklichkeit müssen die Ballonette etwas größer gebaut werden, da wir mit der Möglichkeit zu rechnen haben, daß sich das Gas auch noch durch Temperaturerniedrigung zusammenziehen kann; nimmt man an, daß diese in der Tiefe Δt^0 beträgt, so wird dadurch ein Raum frei von $4\text{‰} \cdot \Delta t \cdot V$ Kubikmeter. Um diesen Betrag müssen die Ballonette vergrößert werden.

Beispiel 58. Die Art und Weise, wie das Ballonet benützt wird, zeigen wir an einem bestimmten Falle. Angenommen, der Führer hat die Aufgabe oder hält es für angezeigt, die Meereshöhe 1000 m nicht zu überschreiten oder gleich von Anfang an in dieser zu fahren. In letzterem Falle wird er mit schlaffem Ballone aufsteigen, so daß er die gewünschte Höhe rasch erreicht; in ersterem Falle wird er warten, bis sich die Fahrtkurve auf 1000 m oder eine Kleinigkeit darüber hebt. In beiden Fällen bleibt bis dahin das Ballonet unbenutzt. Erhält nun aus irgend einer Ursache, etwa einem Wolkenschatten, der Ballon eine Sinkkraft, so geht er in die Tiefe. Jetzt wird der Führer durch Ballastausgabe eingreifen und durch Aufblasen des Ballonettes den Ballon am Schlaffwerden verhindern. Ist der Bremsballast ausgegeben und um einen kleinen Betrag überworfen, so daß der Ballon wieder hochgeht, so wird der Ventilator abgestellt und durch Drosselung des Füllschlauches die geringe Aufstiegsgeschwindigkeit reguliert. Etwas unterhalb 1000 m wieder angelangt, wird der Füllschlauch ganz geschlossen, und der Ballon wird als praller Ballon vom Volumen $V - v$ nur noch wenig weitersteigen, der überworfenen Ballastmenge entsprechend. Diese Höhenüberschreitung kann durch weiteres Aufblasen des Ballonettes vermieden werden; und dies hat stattzufinden, wenn der Wolkenschatten oder überhaupt die störende Ursache unterdessen wieder verschwunden ist. Der Ballon zieht nun in 1000 m Höhe weiter, während er ohne Ballonet höher gestiegen wäre um einen Betrag, welcher der gesamten, ausgegebenen Ballast-

menge entsprechen kann. Aber in beiden Fällen ist die ausgegebene Ballastmenge dieselbe und enthält der Ballon *dieselbe Gewichtsmenge* Füllgas, mit Ballonet auf dem Volumen $V - v$, ohne Ballonet auf dem Volumen V. Dies alles wiederholt sich bei einer neuen Gleichgewichtsstörung.

Wir sehen aus dem vorstehenden Beispiele: *Mit Hilfe eines Ballonettes kann wohl die Folge des Überwerfens vermieden und eine konstante Höhe eingehalten werden, aber ohne Ersparnis an Ballast und Gas. Ist der Ballast aufgebraucht, so enthält der Ballon dieselbe Gewichtsmenge Gas wie ohne Ballonet in seiner Endhöhe.* Der Ballastverbrauch pro Stunde ist mit Ballonet eher größer, da in der Regel die Störungen mit zunehmender Höhe abnehmen. Für Dauerfahrten hat das Ballonet nur Nachteile; denn um das Gewicht seiner Einrichtung nimmt der verfügbare Ballast ab, und die Bedienung des Fahrzeuges wird ungleich umständlicher. Allein das Ballonet hat den unschätzbaren Vorteil, daß mit seiner Hilfe der Führer die Vertikale vollständig beherrscht. Er kann sich die Fahrthöhe, die Luftströmung beliebig auswählen; und dadurch wird das Ballonet ein wichtiges Hilfsmittel für Distanzfahrten. Für Zwecke photographischer Aufnahmen oder militärischer Rekognoszierung kann das Einhalten einer bestimmten Höhe von großer Wichtigkeit sein, namentlich wenn eine zusammenhängende Wolkendecke vorhanden ist; ein Eindringen in dieselbe kann vermieden werden. Durch ein Ballonet kann auch ein Erreichen großer Endhöhen, das sich bei Dauerfahrten in großen Ballonen unliebsam einstellt, vermieden werden; es kann ferner wichtige Dienste leisten, wenn bei unsichtigem Wetter in der Nähe der Küste gefahren werden muß. Sein Nachteil besteht, abgesehen von der Gewichtsvermehrung, die bei zunehmender Ballongröße immer weniger sich geltend macht und wohl unter 100 kg gehalten werden kann, darin, daß der Ballon seiner klassischen Einfachheit beraubt wird. Angesichts der für bestimmte Zwecke außerordentlichen Vorteile wäre es äußerst wünschenswert, durch Versuche zu erproben, wie weit sich letzterer Nachteil durch Übung des Führers herabsetzen läßt.

Der Füllansatz eines sinkenden, schlaffen Ballones schließt sich (vgl. § 4), so daß die Füllung vor Mischung geschützt und die Gasmasse innerhalb der Hülle konstant bleibt. Dieses Schließen hat man bis kürzlich allgemein als Vorteil betrachtet und durch mechanische Hilfsmittel, wie die sogenannte Schere, wirksamer zu machen gesucht. Im Gegensatze hierzu wird an einigen Orten der Füllansatz durch einen Ring, nach Dr. Poeschel, der ihn zuerst verwandte, „*Poeschel-Ring*“ genannt, möglichst

offen gehalten. Ich möchte in Kürze die Vorteile und Nachteile des offen gehaltenen Füllansatzes auseinandersetzen.

Für den steigenden Ballon ist der Ring offenbar ohne Einfluß; der sinkende Ballon aber wird bei genügend weitem Füllansatz durch Einströmen von Luft am Schlaffwerden verhindert; er behält seine *pralle Form* bei.

Nun sind zwei Fälle zu unterscheiden.

1. Fall. Strömt die Luft nicht zu heftig ein, so ist es möglich, daß diese sich mit dem leichten Gas nicht mischt, sondern unterhalb desselben, durch eine scharfe Trennungsfläche geschieden, liegen bleibt. In diesem Falle ist der Ring, außer dadurch, daß der Ballon seine Kugelform beibehält, ohne jeden Einfluß. Denn denken wir uns längs der Trennungsfläche eine dünne Haut gelegt, so wirkt der Luftraum lediglich wie ein Ballonet. Steigt der Ballon, so wird die Luft wieder herausgetrieben; so lange bleibt der Ballon ein Ballon konstanten Gasgewichtes, und zwar eines Gases, das seine Beschaffenheit nicht geändert hat. Außer der Erhaltung der Form hatte der Ring nicht die geringste Wirkung.

2. Fall. Es kommt zu *vollständiger* Mischung zwischen Gas und Luft. Jetzt liegen die Verhältnisse gänzlich anders. Wir haben dann keinen Ballon konstanten Gasgewichts vor uns, sondern einen prallen Ballon, durchweg angefüllt mit einem Gase, dessen Tragkraft pro cbm abgenommen hat in dem Maße, wie Luft eingeströmt ist. Wird der fallende Ballon abgefangen, so kehrt er bei Überwerfen nicht in seine Ausgangshöhe zurück, sondern er steigt nach dem Ballastgesetz wie ein praller Ballon. Der Ring beseitigt in diesem Falle also die Folgen des Überwerfens, und die Weiterfahrt vollzieht sich wie mit einem prallen Ballon, angefüllt mit schlechterem Gase. Die Stabilität nach oben aber ist erkauft worden auf Kosten erreichbarer Höhe, an Ballast ist nichts eingespart worden und von dem Ballastverbrauch wird auch im weiteren Verlaufe der Fahrt nichts geändert, außer daß der Ballon, in tieferen Schichten verbleibend, unter ungünstigeren Fahrtbedingungen ist. Nehmen wir z. B. an, ein 1440 cbm-Ballon mit Leuchtgas von der Tragkraft $T_0 = 0{,}7$ sei aus einer Gleichgewichtslage um 1190 m gesunken; Höhenzahl $n = 1{,}16$. Da $\frac{1440}{1{,}16} = 1240$, folgt, daß das Gas sich auf 1240 cbm zusammengezogen hat und bei offen gehaltenem Füllansatze 200 cbm Luft eingedrungen sind. Durch Mischung mit den 1240 cbm Leuchtgas wird die Tragkraft der Füllung nicht geändert, wohl aber ist jetzt die Hülle gefüllt mit 1440 cbm eines Gases, dessen Tragkraft sich, wie eine leichte Überlegung zeigt, zu $\frac{1240 \cdot 0{,}7}{1440} = 0{,}60 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$ be-

stimmt. Die Weiterfahrt vollzieht sich nach Abfangen wie in einem prallen Ballon, gefüllt mit Gas, dessen Tragkraft $T_0 = 0{,}60 \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$. Da zu der Höhenzahl $n = \frac{0{,}70}{0{,}60} = 1{,}17$ eine Höhendifferenz 1255 m gehört, so folgt (§ 9), daß wir durch den Einfluß des Ringes 1255 m erreichbare Höhe eingebüßt haben.

Wir sehen: Kommt es zu vollständiger Mischung, so sichert der Poeschelsche Ring gegen Überwerfen; er sichert dem sinkenden Ballon Stabilität nach oben, allein auf Kosten der Fahrthöhe. Jedes Sinken des Ballones ist mit Einbuße von erreichbarer Höhe verbunden und muß auf das peinlichste vermieden werden, falls größere Höhen erreicht werden sollen.

Inwieweit der Ring diesen Zweck erfüllt, hängt davon ab, wie vollständig die Mischung von Gas und Luft sich vollzieht. Findet die Mischung nur in der Trennungsfläche statt, so steigt der Ballon so lange als schlaffer Ballon, als durch den Füllansatz nur die tiefer liegende, ungemischte Luft entweicht; so lange ist der Ring wirkungslos. Erst wenn die Gasmischung auszutreten beginnt, verwandelt sich der Ballon in einen Ballon konstanten Gasvolumens, der einem komplizierten Ballastwirkungsgesetze folgend einer neuen Gleichgewichtslage zustrebt, die mit der Ausgangshöhe zusammenfällt, wenn durch starkes Überwerfen alle Mischung herausgetrieben wird und nur reines Gas zurückbleibt. Je weiter der Füllansatz und je rascher der Fall, desto kräftiger die Mischung und desto intensiver die Wirkung des Ringes, die je nach dem Zwecke, dem die Fahrt dienen soll, wünschenswert sein kann oder vermieden werden muß. Für militärische Rekognoszierungsfahrten kann der Ring wertvolle Dienste leisten, falls es zu intensiver Mischung kommt. Darüber können nur Versuche Aufschluß geben, die anzustellen äußerst wünschenswert ist.

§ 21. Zur Höhensteuerung eines Luftschiffes.

In den nachfolgenden Ausführungen soll in möglichster Kürze gezeigt werden, wie die wichtigsten der in den vorstehenden Betrachtungen gewonnenen Sätze bei der Fahrt im Lenkballone zur Anwendung kommen.

Damit sich während der Fahrt der Druck des Windes und das Gewicht der angehängten Last nicht in wechselnder und unkontrollierbarer Weise auf die tragende Hülle verteilen, muß diese von hinreichender Starrheit sein. Diese Eigenschaft kann erfahrungsgemäß einer losen Hülle in hinreichendem Grade verliehen werden, indem mit Hilfe eines Ballonettes ihre Füllung unter

einem geringen Überdrucke gehalten wird; ein Druck von weniger wie 30 mm Wasser = 30 kg/qm ist hinreichend. Ohne Zuhilfenahme eines Ballonettes muß die Hülle aus hinreichend festem Material hergestellt werden; dabei macht es vom fahrtechnischen Standpunkte aus keinen Unterschied, ob sie selbst das Gas abschließt (Schwarz) oder nur die eigentlichen Tragkörper umschließt (Zeppelin). Wir unterscheiden demnach zwischen starren Ballonen ohne und unstarren Ballonen mit Ballonet. Dabei ist nicht ausgeschlossen, daß auch der starre Ballon mit einem Ballonet versehen werden kann; dasselbe hätte dann Aufgaben zu erfüllen wie in einem Freiballon (vgl. § 20); und diese Zwecke kann auch das Ballonet eines unstarren Fahrzeuges zu seinen eigentlichen Funktionen mit übernehmen.

Beide Ballonarten sind mit *Höhensteuerung* ausgerüstet, d. h. mit Vorrichtungen, die bezwecken, dem Fahrzeug *ohne Benützung von Ballast und Ventil* Steig- resp. Sinkkraft zu geben, „dynamisch", wie der technische Ausdruck lautet. Ohne diese Vorrichtung, die mancher wohl nur als angenehme Beigabe betrachtet, würde jeder Lenkballon, und namentlich der starre, einen großen Teil seiner praktischen Verwendungsmöglichkeit einbüßen. Letzterer würde wohl noch die Fähigkeit der Seitensteuerung behalten, aber die Möglichkeit, die Fahrthöhe zu wählen, wäre ihm praktisch genommen; das Fahrzeug würde sich verhalten wie ein Freiballon, der nur am Schlepptau oder in seiner kontinuierlich wachsenden Gleichgewichtshöhe benutzbar ist (§ 19). Das unstarre Fahrzeug hingegen könnte, wie der mit Ballonet ausgerüstete Freiballon, die Fahrthöhe wählen, allein nur auf Kosten von Ballast und Gas. Der geringe Überdruck ändert die beim Freiballon erläuterten Verhältnisse nur ganz unwesentlich; denn bei einem Überdruck von 2 mm Quecksilber beträgt bei einem Barometerstande von 660 mm (zirka 1000 m Höhe) die Dichtezunahme nur $\frac{1}{330}$, kann also vollkommen außer acht gelassen werden. Die Höhen, welche erreichbar sind, werden begrenzt beim starren Ballon durch die Menge des verfügbaren Ballastes und der dynamischen Steigkraft, beim unstarren durch das Fassungsvermögen der Ballonette. (Vgl. die Tabelle der Ballonetgrößen S. 119.)

Ehe wir die Höhensteuerung behandeln, haben wir auf den Hauptnachteil des Ballonettes aufmerksam zu machen. Er besteht in der Schwierigkeit, demselben rasch größere Luftmengen zuführen zu können. Geben wir dem Füllschlauch, der zum Ventilator in die Gondel herabreicht, einen Durchmesser von etwa 35 cm, so muß ihn die Luft mit einer mittleren Geschwindigkeit von 10 m/sek. durchströmen, wenn die beförderte Luftmenge

1 cbm/sek. betragen soll. Größere Luftmengen zu transportieren dürfte deshalb schwierig sein. Da aber (§ 2) ein Luftvolumen V bei einer Vertikalverschiebung von $\pm$ 1 m um $\pm \frac{V}{8000}$ sich ändert, so müßte bei einer Sinkgeschwindigkeit von v m/sek. die sekundlich zuzuführende Luftmenge $\frac{V \cdot v}{8000}$ cbm betragen; z. B. bei $V = 6000$ cbm, $v = 2$ m/sek. bereits $1^1/_2$ cbm. Größere Sinkgeschwindigkeiten wie 1 m/sek. wird also der Führer vermeiden, indem er in einer Schraubenlinie langsamer herabgeht. Auch rasche Abkühlung des Gases, etwa durch Wolkenschatten, kann äußerst störend wirken, da 1° das Volumen um 4‰ ändert. Diese geringe Abkühlung würde bei einem Volumen von 6000 cbm bereits 24 cbm Luftzufuhr erfordern. Den unliebsamen Folgen wird der Führer am sichersten durch Höhergehen ausweichen; er wird dieselben so verhältnismäßig leicht parieren können, da (vgl. § 2) die Volumenverminderung durch 1° Temperaturerniedrigung durch die Druckabnahme entsprechend 30 m Höhergehen ausgeglichen wird. Einen Anhaltspunkt, die Geschwindigkeit der Temperaturänderungen von Ballonfüllungen abzuschätzen, gibt der Umstand, daß sich ein Freiballon beim Sinken um 100 m nicht um 1°, sondern nur etwa 0,4° erwärmt (vgl. § 16); nimmt man dabei eine Sinkgeschwindigkeit von 3 m/sek. an, so ergibt sich, daß der Größenordnung nach die Temperaturerniedrigung eines Ballones bei dem entsprechenden Luftzuge 1° pro Minute beträgt.

Um die Wirkung der Höhensteuerung zu beurteilen, machen wir erst die einschränkenden Voraussetzungen, daß Gleichgewichtsstörungen, sowohl durch Temperaturänderungen, wie durch Verbrauch von Betriebsmaterialien ausgeschlossen sind. Da ein Ballon konstanten Gasgewichts keinerlei Stabilität besitzt, so folgt, daß die geringste Druckkraft der Höhensteuerung nach oben und unten genügt, jedes Fahrzeug, sei es starr oder unstarr, nach Belieben unterhalb einer durch Ballastausgabe erreichten Maximalhöhe auf- und abzuführen, oder in diesem Intervall auf einer beliebig zu wählenden Fahrthöhe zu halten. Dabei kann, wenn keine Nachfüllung stattgefunden hat, diese Maximalhöhe einer früheren Fahrt angehören. Das gleiche ist der Fall, wenn ein starrer Ballon nicht prall abgeht. Sind z. B. die Ballone des Zeppelinschen Fahrzeuges gleichmäßig nur zu 95% angefüllt, so ist das Intervall bis $5 \cdot 80 = 400$ m ohne nennenswerte Beanspruchung der Höhensteuerung beherrschbar. Das gleiche ist der Fall bei der Fahrt eines unstarren Ballones unterhalb seiner Prallhöhe, wenn wir mit diesem Ausdruck die Höhe bezeichnen, oberhalb welcher die Ballonette das Füllgas

abblasen lassen. Oberhalb der Prallhöhen liegen die Verhältnisse völlig anders; die Fahrzeuge geben Gas ab, die starren durch die Füllansätze, die unstarren durch die von den Ballonetten gezogenen oder die Sicherheitsventile; es gelten jetzt die Gesetze des Ballones konstanten Volumens, und für je 80 m Höhensteigerung kann an Stelle einer Ballastabgabe dynamisch mit einer Kraft gleich 1 % der Tragkraft der Füllung gehoben werden. Da die Normaltragkraft des Zeppelinschen Fahrzeuges bei einem Inhalte von 15 000 cbm 18 000 kg beträgt, die Wirkung der Höhensteuerung zu 700 kg angegeben wird, so kann dynamisch eine Höhenzunahme von $80 \cdot \frac{700}{180} = 310$ m bewältigt werden. Der Parseval, $V = 6500$ cbm, der 600 m dynamisch bewältigen soll, muß dazu rund 600 kg Hubkraft entwickeln können. Mit zunehmender Höhe nimmt die Tragkraft des Fahrzeuges ab, in gleichem Maße die Luftdichte und bei gleicher Fahrgeschwindigkeit deshalb auch die Wirkung der Höhensteuerung, so daß die angegebenen Höhenintervalle ungeändert bleiben. Werden von der ersten Prallhöhe ab diese dynamisch erreichbaren Höhenzunahmen überschritten, so kann dies nur durch Gewichtserleichterung geschehen. Unterhalb jeder so erreichten Maximalhöhe kann das Fahrzeug durch eine Wirkung der Höhensteuerung, die sich von ihrer Maximalwirkung äußerst wenig zu unterscheiden braucht, auf- und abgeführt werden; Ballastausgabe kann ihre Beanspruchung auf beliebig kleine Beträge herabsetzen.

Wir lassen nun die beschränkenden Voraussetzungen fallen. Die Gleichgewichtsstörungen (abgesehen von Belastungen durch Regen, Schnee und Tau, deren Behandlung keiner weiteren Auseinandersetzung bedarf), rühren her von Verminderung der Last durch Verbrauch von Betriebsmaterial (Benzin, Kühlwasser und Schmieröl), von Temperatureinflüssen und von vertikalen Luftbewegungen. Ein Luftschiff, starr oder unstarr, das eine Prallhöhe überschreitet, gehorcht denselben Temperaturgesetzen wie ein steigender, praller Freiballon (vgl. § 12). Bei einer Füllung mit Wasserstoffgas ist es gegen *Zunahme* der Sonnenstrahlung so gut wie unempfindlich; pro 1° Temperaturerhöhung desselben gegen die umgebende Luft reagiert es nur mit einem Höhergehen um *2,2* m oder einer Zunahme der Tragkraft um 0,3 ‰; von Einfluß ist nur die Lufttemperatur. Verwandelt aber abnehmende Strahlung das Fahrzeug in einen schlaffen Ballon, oder fährt es unterhalb der Prallhöhe, so reagiert es nur auf die Änderung der Differenz Gas- und Lufttemperatur, unabhängig von der Höhe der letzteren. Mit Rücksicht auf § 13 und S. 104 können wir die Änderung der Tragkraft eines Ballones

von V cbm bei einer Änderung dieser Temperaturdifferenz um $\pm \Delta t^0$ in Annäherung ansetzen zu

$$\Delta G = \pm 4 \cdot \Delta t^0 \cdot \frac{V}{1000} \text{ Kilogramm.}$$

$\Delta t = \pm 10^0$ würde die Tragkraft des Parsevalschen Fahrzeuges $V = 6500$ cbm um ± 260 kg ändern; sinkt beim Zeppelinschen Fahrzeug $V = 18000$ cbm nach Sonnenuntergang Δt um 12^0, so ist zur Kompensation die maximale Leistung der Höhensteuerung notwendig. Da bei einem Freiballon Δt bei Tage auf $40—50^0$ steigen, nachts auf -10 bis -20^0 sinken kann, so werden selbst bei einem durch Luftzug gekühlten und mit Strahlungsschutz versehenen lenkbaren Fahrzeug Δt im Betrage von $10—20^0$ kaum zu vermeiden sein, zu deren Neutralisierung die dynamische Hubkraft nicht mehr ausreicht.

Der Gewinn an Steigkraft durch Verbrauch von Betriebsmaterialien kann zu 30—40 kg pro Stunde und 100 P. S. angenommen werden. Steigt ein Luftschiff ohne Nachfüllung wiederholt, oder überhaupt nicht prall gefüllt, genau abgewogen auf, so wird es in kürzester Zeit seine Prallhöhe erreicht haben, und der Weiterstieg erfolgt mit einem Gasverlust derart, daß gleichzeitig 0,074 kg Füllgas und 1 kg Betriebsmaterial verschwinden (vgl. S. 54). Einhalten einer bestimmten Fahrthöhe ist nur möglich, solange der abwärts gerichtete Druck der Höhensteuerung den Materialverbrauch zu kompensieren imstande ist. Von da ab steigt das Fahrzeug wie ein gewöhnlicher Freiballon weiter, falls nicht durch Ballastaufnahme bei einer Zwischenlandung, oder durch Ventilzug oder Vergrößerung der Ballonette Gas abgegeben und die Höhensteuerung entlastet werden kann. *Die Entlastung des Ballones durch Verbrauch von Betriebsmaterial ist deshalb kein Gewinn, sondern eine kontinuierliche Ballastabgabe, die den Ballon höher treibt und dadurch die Fahrt ihrem Ende entgegenführt.* Der scheinbare Vorteil der stetigen Entlastung ist in Wirklichkeit der Hauptnachteil eines lenkbaren Fahrzeuges, da er schließlich nur durch Gasverlust oder eine Zwischenlandung mit Ballastaufnahme bekämpft werden kann, falls nicht Temperaturänderungen, etwa durch Anbruch der Nacht, die Höhensteuerung wieder entlasten.

In bezug auf vertikale Luftströmungen gelten in verstärktem Maße die beim Freiballon (S. 107) gegebenen Auseinandersetzungen. Die Kräfte, mit denen jene die ungleich größeren, lenkbaren Fahrzeuge angreifen, sind so gewaltige, daß jeglicher Widerstandsversuch schon bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten vergeblich ist. Nehmen wir an, daß bei dem Zeppelinschen Fahrzeug bei einer Länge von 136 m und einem Durchmesser von 13 m der

Querschnitt rund 1500 qm beträgt, und tragen wir der Zylinderform durch den Faktor $^2/_3$ Rechnung, so ergibt sich, daß ein senkrecht zur Längsachse gerichteter Wind von 1 m/sek. bereits mit rund 100 kg drückt. Ein vertikaler Wind von nur 2,6 m/sek. würde einen der maximalen Leistung der Höhensteuerung gleichen Druck von 700 kg ergeben. Vertikale Winde von nur 4—5 m/sek. würden mit Drucken von mindestens 1600—2500 kg angreifen. Dabei haben wir das Fahrzeug als ruhend betrachtet; der Winddruck steigt aber außerordentlich, wenn das Fahrzeug noch horizontale Geschwindigkeit besitzt. Ist diese v, die Vertikalgeschwindigkeit des Windes w m/sek., so steigt der Winddruck (wie sich leicht zeigen läßt, da derselbe dem sinus des Anströmungswinkels proportional ist), im Verhältnis von $w^2 : w^2 \sqrt{1 + \frac{v^2}{w^2}}$, also stärker wie $w^2 : w \cdot v$, falls das Fahrzeug nicht ganz anderen Gesetzen gehorcht, wie eine horizontalbewegte, ebene Platte. Der Druck einer vertikalen Strömung von 3 m/sek. kann durch die horizontale Geschwindigkeit des Fahrzeuges von 12 m/sek. leicht auf das 4fache gesteigert werden. Die an heißen Sommertagen unvermeidlichen vertikalen Luftströmungen können ein mit beträchtlicher Geschwindigkeit fahrendes Luftschiff leicht in unerwünschte Höhen emportragen (vgl. unten Beispiel 59), geringe absteigende Winde dasselbe zur Landung zwingen.

Eine sehr unliebsame Beanspruchung der Höhensteuerung kann sich ergeben, wenn der Gasraum kein zusammenhängendes Ganzes, sondern in Zellen abgeteilt ist, wie etwa beim Zeppelinschen Fahrzeug. Durch Luftzug während der Fahrt werden die vorderen Zellen stärker abgekühlt wie die rückwärts liegenden; diese können außerdem durch die Sonnenstrahlung stärker erwärmt werden, wenn der Schiffskörper Richtung nach Norden hat. Fährt das Schiff nicht unterhalb seiner Prallhöhe, so ist es, wenn die Füllung aus Wasserstoff besteht, gegen diese ungleiche Temperierung seiner prallen Zellen so gut wie unempfindlich. Überwiegt aber gegen Abend die Ausstrahlung, sinkt die Gastemperatur und werden die Zellen schlaff, so gelten die Temperaturgesetze des schlaffen Ballones, und das Fahrzeug erfährt ein Drehmoment, welches die Spitze aufwärts richtet. Ist der Inhalt einer Zelle 1000 cbm, und nehmen wir an, daß die bei Tage sich bildende Temperaturdifferenz Δt Gas — Luft einer rückwärtigen Zelle um 10^0 stärker sich vermindert wie in einer vorderen Zelle, so wird letztere schließlich rund 40 kg mehr Tragkraft behalten wie jene, und diese Kraft wirkt an einem Hebelarm gleich dem Zellenabstand. Durch Zusammenwirkung mehrerer Zellen kann die Spitze des Schiffes kräftig gehoben werden, was besonders dann unbequem werden

kann, wenn die Steuerung des Schiffes Spitze nach abwärts verlangt.

Beispiel 59. Wir lesen über die Fahrt des Zeppelinschen Luftschiffes vom 4. August 1908 (Die Luftschiffahrt, von Graf Friedr. v. Zeppelin und anderen Fachmännern, S. 115): „Die im Rheintal zur Mittagszeit einsetzende große Hitze begann ihre Wirkung auszuüben. Die an sich vorzüglich erdachte Isolierung der inneren Gasballone von der äußeren Hülle erwies sich dem gegenüber als doch nicht voll genügend, das durch die Erwärmung ausgedehnte und spezifisch leichter werdende Wasserstoffgas gab dem Schiff einen starken Auftrieb, dem, wie gesagt, bei der langsamen Fahrt mit den dynamischen Steuern nicht begegnet werden konnte. Der Ballon stieg bis weit über 1000 m hoch." Diese Erklärung des Sachverhaltes ist offenbar gänzlich ungenügend. Denn das steigende Fahrzeug gehorchte den Temperaturgesetzen des prallen Ballones, der bei Wasserstoffüllung auf Zunahme der Gastemperatur praktisch unempfindlich ist. 1^0 Zunahme der Gas- über Lufttemperatur hebt (vgl. S. 46) das Fahrzeug nur um 2,2 m, 50^0 also nur um 110 m! Die ganze Wasserstoffüllung des Fahrzeugs bei 0^0 und 760 mm wiegt $15000 \cdot 0{,}089 = 1335$ kg; eine Erwärmung um 50^0 würde rund nur 250 kg Gas austreiben!) Ist das Wort „Hitze" außerdem so aufzufassen, als wären hohe Lufttemperaturen angetroffen worden, so würde für jeden Grad über Null die Gleichgewichtshöhe 30 m herabgedrückt worden sein (vgl. § 12). Die „Hitze" kann also unmöglich die Ursache des hohen Aufstiegs gewesen sein. Vielmehr wird einesteils bei der verlangsamten Fahrt der dynamische Auftrieb nicht hingereicht baben, die durch Verbrauch von Betriebsmaterial eingetretene und stetig zunehmende Steigkraft zu kompensieren. Sodann muß sich im sonnenbeschienenen Tale aufsteigende Luftbewegung ausgebildet haben. Um das Fahrzeug 800 m zu heben, gehört nach dem Ballastgesetz eine Kraft von höchstens 1800 kg. Nimmt man die reduzierte, horizontale Querschnittsfläche des Fahrzeugs zu rund 1000 qm an, seine horizontale Geschwindigkeit zu 10 m/sek., so würde (S. 127) ein aufsteigender Luftstrom von rund 1,8 m/sek. schon hingereicht haben, das Schiff um 800 m zu heben. Wurde nach der Zwischenlandung am Abend des 4. August das Schiff ohne Nachfüllung erleichtert, so mußte es mindestens die Höhe des vorhergehenden Aufstieges erreichen, um von da ab durch Verbrauch von Betriebsmaterial stetig an Steigkraft gewinnend größeren Höhen zuzustreben.

Beispiel 60. Wir lesen (Neumann, Die internationalen Luftschiffe, S. 21) in bezug auf den Parseval A 2 ($V = 4000$ cbm) „Im Oktober 1908 stieg er lediglich mittels Schraubenwirkung

bis 1100 m und von dort bis 1600 m mit Hilfe von Ballastausgabe, in welcher Höhe das Schiff etwa 1 Stunde fuhr. Es stellt dies gleichzeitig die größte Höhe dar, welche Parsevalschiffe bis jetzt erreichten." Diese Fassung ohne nähere Ausführung kann leicht zu der irrigen Meinung veranlassen, als wäre 1100 m die größte Höhe, die dies Schiff dynamisch erreichen kann. Allein füllen wir das Fahrzeug mit nur 3500 cbm Wasserstoff, und kann es sich damit erheben, so wird es ohne jegliche Unterstützung in seine Prallhöhe von 1100 m emporsteigen, und ebenso auf 1600 m, wenn es mit 3300 cbm Füllung vom Erdboden loskommen kann. Werden bei der Abfahrt die Ballonette zu ihrem Maximalvolumen aufgeblasen, und kommt das Schiff hoch, so steigt es ohne jede Unterstützung bis zu seiner Maximalhöhe, die nur durch das Fassungsvermögen der Ballonette begrenzt ist. Dabei hat schließlich die Höhensteuerung einzugreifen, aber nicht um zu heben, sondern um abwärts zu drücken, damit durch Benzinverbrauch usw. nicht die zulässige Maximalhöhe überschritten wird. *Überhaupt wird bei jedem lenkbaren Luftschiff in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle die Höhensteuerung nicht zur Hebewirkung, sondern im umgekehrten Sinne benutzt, um den lästigen Gewinn an Tragkraft durch Verbrauch von Betriebsmaterial auszugleichen.* Die entsprechende Lage der Schiffsachse, Spitze des Fahrzeuges immer mehr nach unten geneigt, stellt sich von selbst ein, wenn bei Fahrzeugen mit 2 Gondeln in der rückwärtigen der Materialverbrauch durch stärkere Motore erhöht wird.

Die Höhensteuerung selbst vollzieht sich derart, daß bei den meisten Schiffen die Spitze des Fahrzeugs durch das Höhensteuer gehoben oder gesenkt wird. Auf gleiche Weise kann auch bei einem starren Schiffe verfahren werden; doch läßt das Zeppelinsche Fahrzeug noch eine andere Art Höhensteuerung zu. Die vorn und hinten angebrachten Höhensteuer selbst können schief gestellt bei horizontaler Achse des Fahrzeuges beträchtliche Druckkräfte aufnehmen. Für letztere Art der Höhensteuerung läßt sich ein merkwürdiger Satz ableiten. Angenommen, die schädlichen Widerstände der Tragflächen seien zu vernachlässigen, d. h. bei Stellung der Flächen parallel zur Fahrtrichtung soll ihr Widerstand nicht in Betracht kommen gegenüber dem eigentlichen Schiffswiderstand, und weiter angenommen, der Zug der Propeller sei unabhängig von der Fahrtgeschwindigkeit, so läßt sich zeigen 1. daß durch Vergrößerung der Tragflächen ihre Druckwirkung nach oben und unten beliebig gesteigert werden kann, 2. daß dabei die Fahrtgeschwindigkeit nie um mehr als 30% unter die Geschwindigkeit bei unbelasteten Tragflächen sinken kann.

Die erst erwähnte Art der Höhensteuerung, schief gestellte Achse des Fahrzeugs und dieser parallel der Propellerschub, gestattet keine eingehendere, quantitative Untersuchung, da wir über Größe und Richtung des Luftwiderstandes bei dieser Stellung des Fahrzeuges zu wenig orientiert sind. Soll der Schwerpunkt des mit einer Sink- oder Steigkraft G Kilogramm behafteten Fahrzeuges eine horizontale Bahn beschreiben, so muß die Achse des Fahrzeuges unter einem $\sphericalangle \alpha$ geneigt werden, der so bemessen ist, daß G, der Propellerschub Z und der Luftwiderstand W sich das Gleichgewicht halten. (Nur wenn $G = 0$, fällt W in Richtung Z, und verschiebt sich das Fahrzeug ohne Drachenwirkung längs seiner Achse). Sind G und Z gegeben, so ist der Winkel α in außerordentlichem Maße von der Fahrtgeschwindigkeit abhängig; $\sin \alpha$ verhält sich nahezu umgekehrt wie V^4. Kleine Neigungen der Achse, kleine Hebe- resp. Sinkwirkungen können somit ohne nennenswerten Verlust an Geschwindigkeit erzielt werden; eine Verlangsamung der Fahrt tritt erst bei stärkerer Neigung ein.

Erinnern wir uns nochmals an die Bedeutung der Höhensteuerung. Der Freiballon ist auf Fahrt am Schlepptau oder in Prallhöhe angewiesen: ein Ballonet gestattet die Fahrthöhe zu wählen, ohne aber dabei Ballast einzusparen; die Höhensteuerung aber gestattet Fahrt unter Prallhöhe ohne Ballast- und Gasverbrauch. Nun ist nach weitverbreiteter Meinung der Aktionsradius eines Luftschiffes bestimmt durch die Menge des mitgeführten Betriebsmaterials, wie mir scheint, mit Unrecht. Auf diese Weise ist lediglich eine Grenze bestimmt, die nicht überschritten werden kann; in erster Linie, namentlich bei Fahrten im Feindesland, ist die Grenze von Bedeutung, die ohne Zwischenlandung noch erreichbar ist. Sie ist praktisch erreicht, sowie die Gleichgewichtsstörungen sich derart summiert haben, daß die Höhensteuerung, sei es nach oben oder unten, voll belastet ist. Durch Opfer von Ballast oder Gas, unter Umständen durch eine Zwischenlandung zur Aufnahme von Wasserballast, oder durch Temperaturänderungen, kann dieselbe vorübergehend wieder frei gemacht werden. Liegt diese Möglichkeit nicht mehr vor, so verhält sich das Fahrzeug wie ein Freiballon, aber von sehr ungünstiger Form und einem im Verhältnis zu seinem Volumen geringen Ballastvorrat, so daß die Fahrt rasch zu Ende geht, bei böigem Winde vielleicht unmöglich ist. Jedes Luftschiff hat eben noch zu viel vom Freiballone an sich; es unterscheidet sich von diesem nur, so lange die Höhensteuerung nicht im Maximum belastet ist. Ist diese nach 20- bis 30stündiger Fahrt dauernd voll beansprucht, so sind die Benzinvorräte für weitere 60stündige Fahrt in erster

Linie als verfügbarer Ballast zu betrachten. Motordefekte können verhängnisvoll werden, nicht sowohl, weil die Reisegeschwindigkeit abnimmt, als weil die Wirkung der Höhensteuerung, welche dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist, nachläßt.

Diese letzten Betrachtungen sind auch von Wichtigkeit bei Beantwortung der Frage, wie sich der Führer eines Luftschiffes bei Sturm zu verhalten hat. Für ein unstarres Luftschiff ist diese Frage weniger von Bedeutung, da dasselbe nach erfolgter glücklicher Landung durch die Reißbahn rasch entleert werden kann. Der im Sturm gelandete starre Ballon aber verhält sich, wie ein Schiff in der Brandung der Küste und ist verloren, wenn die Verankerung nicht standhält. Wie dieses beim Sturm aufs offene Meer, gehört jener in höhere Luftschichten. Zwar drohen ihm auch hier Gefahren, böige Winde können hart zusetzen, aber ungleich gefahrvoller ist seine Lage vor Anker. Eine Landung sollte deshalb unter allen Umständen vermieden werden. Dies gilt aber nur, solange das Schiff der Steuerung, namentlich der Höhensteuerung gehorcht. Seiner Form wegen eignet es sich bei unregelmäßigen Winden nicht als Freiballon, der verhältnismäßig geringe Ballastvorrat gestattet ihm keine lange Fahrtdauer. Der Führer wird deshalb vor allem beurteilen müssen, wie lange ihm die Möglichkeit der Steuerung zu Gebote steht; er wird sich dann entschließen müssen, noch im Besitze derselben an verhältnismäßig günstiger Stelle zu landen, um nicht, steuerlos werdend, Fahrzeug und Leben der Mitfahrenden aufs Spiel zu setzen.

Diese durch Verbrauch von Betriebsmaterial stetig zunehmende Belastung der Höhensteuerung ist noch nach anderer Richtung hin von Bedeutung. Die Geschwindigkeit der Luftschiffe sucht man durch stärkere Motore zu erhöhen. Bei horizontaler Achse des Fahrzeuges kann dadurch der angestrebte Zweck auch erreicht werden. Aber proportional dem Materialverbrauch muß die Höhensteuerung beansprucht werden und sinkt die Geschwindigkeit. Je mehr Pferdekräfte mitgeführt werden, desto größer der Materialverbrauch und desto rascher die Geschwindigkeitsabnahme. Es kann deshalb sehr wohl der Fall eintreten, daß das anfänglich raschere Fahrzeug bei Dauerfahrten sich schließlich als das langsamere herausstellt. Die mittlere Geschwindigkeit bei langer Fahrtdauer ist nicht nur durch die Motorstärke, sondern auch in hohem Maße durch die Beanspruchung der Höhensteuerung bestimmt, die mit dem größeren Materialverbrauch stärkerer Motore zunimmt. Die Bestimmung der günstigsten Motorstärke je nach der Schiffstype und der beabsichtigten Verwendung derselben wird eine wichtige Aufgabe praktischer Versuche sein.

§ 22. Zur Seitensteuerung eines Luftschiffes.

Das Seitensteuer eines Luftschiffes ist wie dasjenige eines jeden Schiffes notwendig, wenn eine bestimmte Fahrtrichtung eingehalten werden soll. Eine stetige Änderung derselben vollzieht sich auch ohne Steuer, allein nur mit Steuer kann der neue Kurs eingehalten werden.

Wird das Seitensteuer eines Luftschiffes frei gegeben, so dreht dieses aus seiner Fahrtrichtung ab; ob nach rechts oder links, ist durch eine geringe, unvermeidliche Unsymmetrie seines Baues bestimmt. Sein Schwerpunkt beschreibt anfangs eine Kurve, die wir unten näher besprechen werden. Allein sehr bald, etwa wenn das Schiff um 90^0 sich gedreht hat, wird diese Kurve ein Kreis, wir nennen ihn einen Steuerkreis, der von dem Luftschiff derart zurückgelegt wird, daß seine Kielrichtung mit der durch den Schwerpunkt gelegten Kreistangente einen konstanten Winkel nach innen bildet. Während der Schwerpunkt den Kreis ganz durchläuft, hat das Schiff sich um 360^0 um die vertikale Achse gedreht und steht sich wieder parallel. Radius des Kreises und Schiffsgeschwindigkeit bestimmen sich derart, daß Propellerschub, Luftwiderstand und Zentrifugalkraft sich das Gleichgewicht halten. Statt das Steuer frei zu geben, kann dasselbe auch in beliebiger Lage festgehalten werden. Dann ändert sich im wesentlichen nichts; nur dem geänderten Luftwiderstand entsprechend ändert sich der eben betrachtete Kreis, so daß ein neuer Steuerkreis von anderem Radius an seine Stelle tritt, der mit anderer, konstanter Geschwindigkeit mit anderer Kielrichtung durchlaufen wird. Ob die Atmosphäre in Ruhe oder in gleichmäßig strömender Bewegung ist, ist vollständig gleichgültig; in letzterem Falle wird der Steuerkreis mit Windgeschwindigkeit über die Erde hinweggetragen.

Diese Tatsache, daß ein Schiff bei freigegebenem oder in beliebiger Stellung festgehaltenem Steuer einen Steuerkreis beschreibt, macht es möglich, während der Fahrt Richtung und Stärke des Windes zu messen, ohne die Geschwindigkeit des Fahrzeuges zu kennen. Denn hat das Fahrzeug einen Steuerkreis gerade einmal durchlaufen, was daran zu erkennen ist, daß seine Kielrichtung zur Ausgangsrichtung wieder parallel wird, so ist dasselbe zu den gleichen Luftteilchen zurückgekehrt, die es verlassen hatte; einen kleinen, ausgesetzten Ballon würde es jetzt wieder antreffen. Dadurch ergibt sich folgendes einfache Verfahren. Soll während der Fahrt die Windgeschwindigkeit gemessen werden, so wird das Steuer freigegeben oder in beliebiger Lage fixiert; hat das Schiff sich etwa um 90^0 gedreht, so kann man annehmen, daß dasselbe begonnen hat, einen Steuerkreis zu beschreiben. Wir

notieren die Zeit Z_1, merken uns die Kielrichtung mit Hilfe des Kompasses oder durch Anvisieren eines genügend entfernten Punktes der Erdoberfläche und markieren auf der Karte den Ort *A*, über dem wir uns augenblicklich befinden. Wir warten ab, bis die Kielrichtung wieder dieselbe geworden ist, was durch den Kompaß oder durch Visieren leicht festzustellen ist, beobachten den Ort *B*, über dem wir uns befinden, und notieren die Zeit Z_2. Dann gibt *AB* die Richtung des Windes, und seine Geschwindigkeit ist gleich der Strecke *AB* dividiert durch die Zeit $Z_2 - Z_1$. Die ganze Messung nimmt wenige Minuten in Anspruch; die Genauigkeit ist nur davon abhängig, in welchem Maße während dieser kurzen Zeit Richtung und Stärke des Windes konstant geblieben sind. Fährt im Anschluß an diese Messung das Fahrzeug noch einige Minuten in der Richtung des Windes oder entgegengesetzt, so ist seine Geschwindigkeit durch Messung der Reisegeschwindigkeit gegeben.

Sind die Geschwindigkeit eines Luftschiffes, sowie Richtung und Geschwindigkeit des Windes bekannt, so besteht die wichtigste Aufgabe der Seitensteuerung in der Bestimmung der Richtung, nach welcher dasselbe gesteuert werden muß, um eine vorgeschriebene Reiserichtung einzuschlagen. Soll ein Luftschiff von einem Orte *A* nach einem Orte *B* fahren, so lassen sich auch die beiden folgenden Aufgaben stellen: Wie muß der *A*-*B* verbindende Weg beschaffen sein, damit bei gegebener Windrichtung und Windstärke 1. die Fahrzeit ein Minimum, 2. der Benzinverbrauch ein Minimum wird? Es läßt sich zeigen, daß diese beiden Wege, der Weg kürzester Zeit und der Weg kleinster Arbeit, zusammenfallen mit dem Wege kürzester Länge, d. i. die Gerade *AB*. Sie läßt sich vollständig erledigen mit Hilfe der beigelegten *Tafel der Seitensteuerung*, Tafel III, deren Gebrauch wir an Hand der Fig. 5 und eines Beispiels erläutern.

Die Tafel ist durchsetzt von vertikalen Geraden, Linien konstanter Geschwindigkeit; die Geschwindigkeiten sind gemessen in Kilometer/Stunde, im Maßstab 1 Kilom./Stunde = 1 mm. Außer der horizontalen Achse trägt auch die vertikale Mittellinie diese Geschwindigkeitsteilung. Die Tafel zeigt ferner eine Windrose, sowie ein System konzentrischer Hilfskreise im Abstande von 1 cm. Sie wird derart auf die Karte gelegt, daß ihr Mittelpunkt mit dem Ballonort zusammenfällt und die vertikale Mittellinie in die gewünschte Reiserichtung. Wir gehen (Fig. 5) nun in Richtung des Windes von *O* auswärts, bis wir eine vertikale Geschwindigkeitslinie treffen, entsprechend der Geschwindigkeit des *Fahrzeuges*, Punkt *A*. Wir folgen dem durch *A* gelegten Kreis, bis wir auf der anderen Seite der vertikalen Mittellinie

eine vertikale Geschwindigkeitslinie treffen, entsprechend der Geschwindigkeit des *Windes*, Punkt B. Dann ist, wie sich leicht zeigen läßt, OB die Richtung, nach welcher gesteuert werden muß, um in der vorgeschriebenen Richtung zu reisen.

Beispiel 59. Wir unterscheiden 2 Fälle, je nachdem der Winkel der Windrichtung mit der gewünschten Reiserichtung kleiner oder größer als 90⁰ ist.

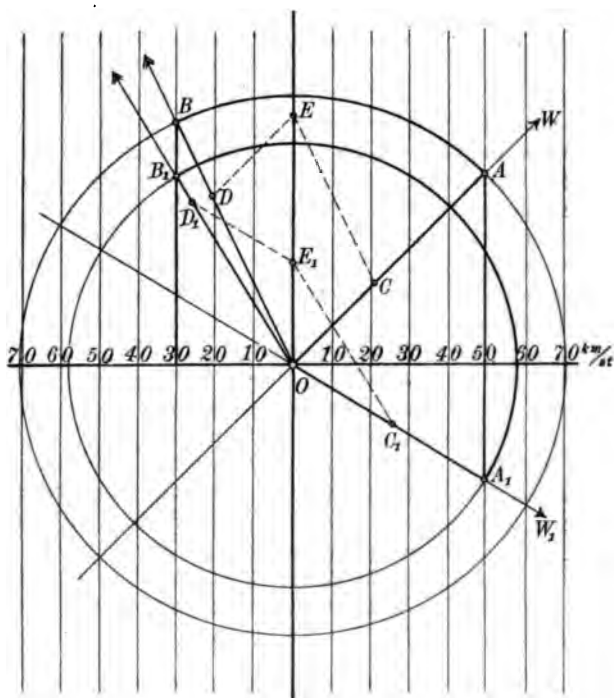


Fig. 5.

1. Fall. Die Windgeschwindigkeit sei 30 Kilom./Stunde in Richtung OW, Fig. 5, die Geschwindigkeit des Fahrzeuges 50 Kilom./Stunde. Nach der erläuterten Konstruktion erhalten wir die zu steuernde Richtung OB. Wir sehen aus des Figur sofort, daß bei Windgeschwindigkeiten über 70 Kilom./Stunde der Hilfskreis die entsprechenden vertikalen Geschwindigkeitslinien nicht mehr trifft; wir erhalten so ohne weiteres die maximale Windgeschwindigkeit, bei welcher die vorgeschriebene Reiserichtung noch möglich ist. Bei derselben muß das Schiff rechtwinklig zur Reiserichtung gesteuert werden. Wir verlängern OW

nach rückwärts und sehen, daß es bei Windgeschwindigkeiten zwischen 70 und 50 Kilom./Stunde (letztere gleich der Schiffsgeschwindigkeit) zu 2 Schnittpunkten kommt, die höher wie die rückwärtige Verlängerung von $O\,W$ liegen. In diesem Falle ist es möglich, die Reiserichtung bei 2 verschieden gesteuerten Kursen einzuhalten, wobei sich eine größere und eine kleinere Reisegeschwindigkeit ergibt. Bei Windgeschwindigkeiten kleiner wie die Schiffsgeschwindigkeit ist nur ein gesteuerter Kurs möglich, da, wie leicht einzusehen, nur der Schnittpunkt benutzt werden darf, der höher wie die Richtung $O\,W$ liegt. Die Unzulässigkeit, den anderen Schnittpunkt zu benützen, ergibt sich, wenn wir die Reisegeschwindigkeit bei den vorliegenden Verhältnissen bestimmen. Wir gehen dazu in Windrichtung um eine Strecke gleich der Windgeschwindigkeit vorwärts, Punkt C, was sich mit Hilfe der Kreise und der Teilung der Mittellinien leicht ausführen läßt, und ebenso in der gesteuerten Richtung um eine Strecke gleich der Schiffsgeschwindigkeit, Punkt D. Wir suchen den 4. Eckpunkt E des Parallelogramms $O\,C\,D\,E$; er liegt selbstverständlich auf der Mittellinie und gibt mit Hilfe ihrer Teilung die Reisegeschwindigkeit zu 66 Kilom./Stunde.

2. Fall. Die Windrichtung $O\,W_1$ verlängern wir rückwärts. Durch den Schnittpunkt A_1 mit der Linie, welche der Schiffsgeschwindigkeit entspricht, ziehen wir den Hilfskreis. Da aus demselben Grunde wie im 1. Falle nur ein Schnittpunkt mit einer der Windgeschwindigkeit entsprechenden Vertikalen benutzt werden darf, wenn er höher wie die Richtung $O\,W_1$ liegt, sehen wir sofort, daß die Windgeschwindigkeit in diesem Falle nicht größer wie die Schiffsgeschwindigkeit sein darf. Ist jene wieder gleich 30 Kilom./Stunde, so ergibt sich der Schnittpunkt B_1 und dadurch die zu steuernde Richtung $O\,B_1$. Um die Reisegeschwindigkeit zu finden, konstruieren wir wie im 1. Fall das Parallelogramm $O\,C_1\,D_1\,E_1$, der 4. Eckpunkt E_1 gibt die Reisegeschwindigkeit in unserem Falle gleich 28 Kilom./Stunde.

Sollte es bei großen Geschwindigkeiten und Richtungen, die von der Reiserichtung wenig abweichen, nicht mehr zu Schnittpunkten von Richtungs- und Geschwindigkeitslinien kommen, so denke man sich die Zeichnung in $1/2$, eventuell $1/3$ Maßstab angelegt, was ohne weiteres dadurch geschieht, daß man die angeschriebenen Geschwindigkeiten verdoppelt, eventuell verdreifacht annimmt. Auf ebenso einfache Weise lassen sich mit Hilfe dieser Tafel sämtliche Aufgaben lösen, die sich in bezug auf Seitensteuerung stellen lassen.

Ist der Wind nach Richtung oder Stärke bekannt, so kann mit Hilfe der Tafel aus einer Reisegeschwindigkeit die Geschwindigkeit des Schiffes leicht bestimmt werden. Bereist das

Schiff eine *geschlossene* Bahn, so ist für die Reisezeit die Windstärke nicht, wie merkwürdigerweise vielfach geglaubt wird, ohne Einfluß; denn ist die Windgeschwindigkeit größer wie die Schiffsgeschwindigkeit, so kann eine geschlossene Bahn überhaupt nicht bereist werden. In welch hohem Maße die Windstärke die Reisezeit beeinflußt, zeigen wir an einem einfachen Beispiele.

Beispiel 60. Ein Luftschiff (oder ein Drachenflieger) von der konstanten Geschwindigkeit v Meter/sek. reise auf einem Kreise, d. h. die Projektion der Fahrtkurve auf die Erde sei ein Kreis von Radius r Meter. Die Windgeschwindigkeit sei w Meter/sek. In welcher Zeit Z beschreibt das Schiff den Kreis? — Wir stellen das Ergebnis der Rechnung[1]) in der folgenden kleinen Tabelle zusammen. v sei = 20 m/sek. = 72 Kilom./Stunde angenommmen, w ausgedrückt in Bruchteilen von v. Die Zahlen der Tabelle mit r multipliziert geben die Zeit Z in Sek. Für andere Geschwindigkeiten v_1 sind sie im Verhältnis $v : v_1$ zu vergrößern.

Tabelle der Reisegeschwindigkeit

für v = 20 m/sek. = 72 Kilom./Stunden

w		$\frac{Z}{r}$
w = 0	v	$\frac{Z}{r}$ = 0,3142 Sekunden
0,10	„	0,3164
0,20	„	0,3216
0,30	„	0,3369
0,40	„	0,3593
0,50	„	0,3912
0,60	„	0,4429
0,70	„	0,5514
0,80	„	0,7100
0,90	„	2,9100
1,00	„	∞

Wir sehen, daß der Einfluß der Windstärke anfangs gering ist, aber immer rascher zunimmt. Eine Windgeschwindigkeit gleich halber Schiffsgeschwindigkeit steigert die Umlaufszeit gegenüber Windstille bereits beinahe genau um 25%.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei anderen geschlossenen

---

[1]) Die Rechnung ergibt

$$Z = \frac{4rv}{v^2 - w^2} \cdot E,$$

worin E das vollständige elliptische Integral 2. Gattung von Modul $k^2 = \frac{w^2}{v^2}$ bedeutet.

Bahnkurven. Wird wie gewöhnlich ohne Messung der Windgeschwindigkeit die Geschwindigkeit eines Drachenfliegers be-

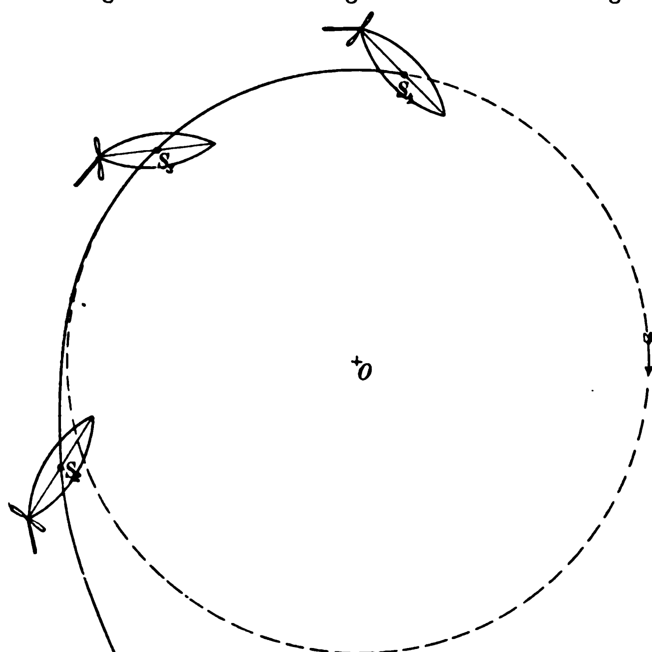
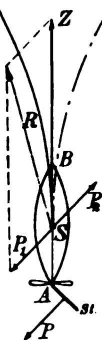


Fig. 6.



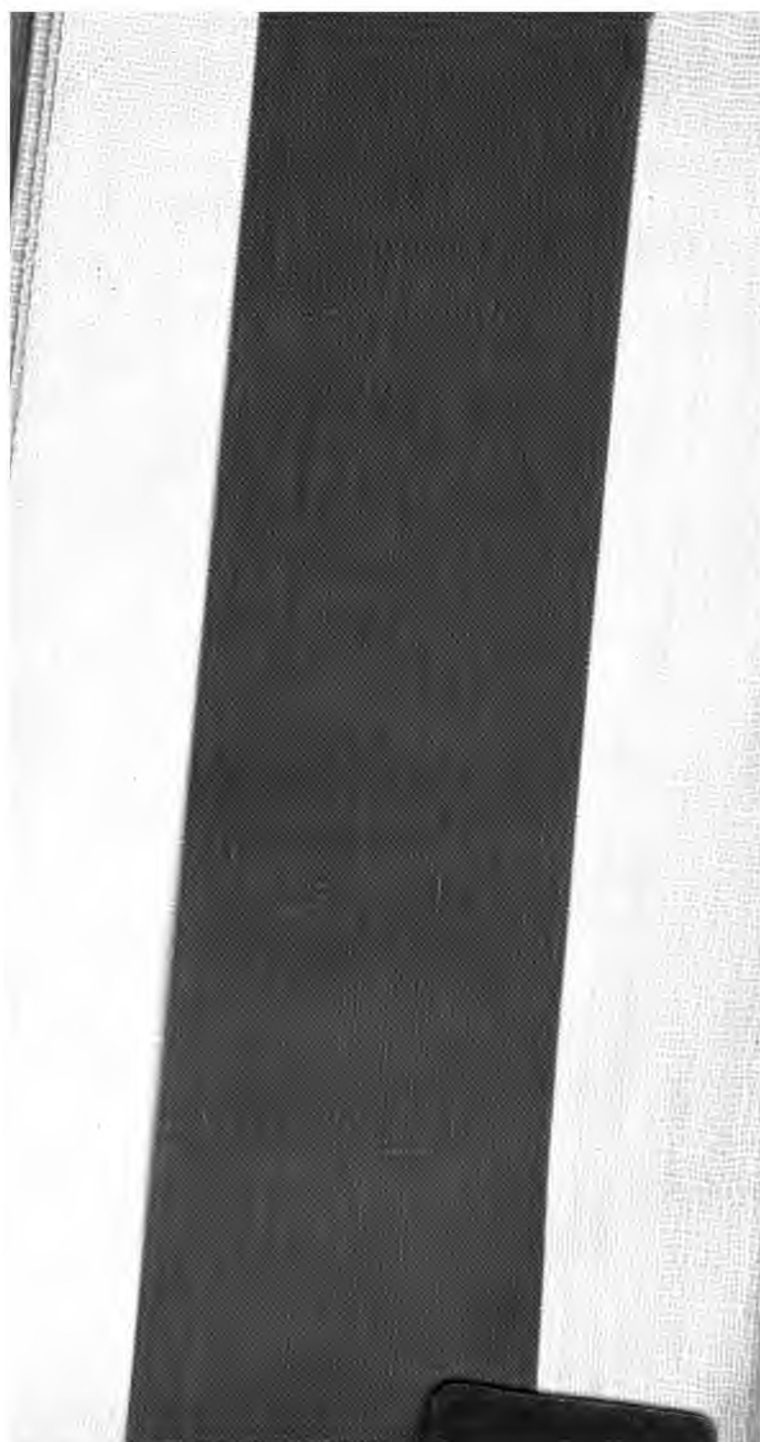
stimmt durch die Dauer des Durchfliegens einer geschlossenen Kurve, so ist der Flieger am meisten begünstigt, der bei schwächstem Winde fliegt.

Wir sahen oben, daß ein Luftschiff bei fixiertem Steuer schließlich einen Steuerkreis beschreibt. Betrachten wir noch die Art und Weise, wie es in den Steuerkreis einlenkt.

Die Kielrichtung *AB* sei die ursprüngliche Fahrtrichtung. Durch den Schwerpunkt *S* des Schiffes wirkt stets in Kielrichtung die Schraube mit einem Drucke von *Z* Kilogramm. Das Steuer *St* werde nun rasch nach rechts geschlagen, wie Fig. 6 zeigt, und diese Stellung festgehalten. Um die Wirkung des (hinreichend genau) senkrecht zu *St.* auftretenden Steuerdruckes *P* zu

prüfen, verfahren wir nach bekannten Regeln am zweckmäßigsten so, daß wir durch den Schwerpunkt S zwei Kräfte P_1 und P_2 legen, P gleich, P_1 zu P parallel und P_2 entgegengesetzt gerichtet, die sich somit gegenseitig neutralisieren. Von den vier Kräften P, P_1, P_2 und Z liefern P und P_2 ein Drehmoment, welches das Schiff im Sinne des Uhrzeigers um seinen Schwerpunkt dreht, während P_1 und Z eine Resultierende R geben, welche im Schwerpunkt angreifend das Schiff als Ganzes verschiebt. Bei Seeschiffen mit großem Seitenwiderstand kommt von der Kraft P_1 praktisch nur die Komponente zur Wirksamkeit, die entgegengesetzt Z in Kielrichtung fällt, und das Schiff biegt rasch auf der gestrichelt gezeichneten Bahn ab. Bei dem kleinen Seitenwiderstand der Luftschiffe aber kommt P_1 voll zur Geltung, und unter Einfluß der Resultierenden R wird das Schiff aus der gestrichelten Kurve nach außen herausgetrieben, wie etwa ein auf glitschiger Bahn abbiegendes Automobil. Statt nach rechts abzubiegen, fährt das Schiff erst auf dem Wege $S_1 S_2 S_3 \ldots$ nach links, unter Wirkung des Kräftepaares PP_2 sich gleichzeitig nach rechts drehend. Etwa von der Lage S_3 aus, in der es sich bereits um 90^0 gedreht hat, wird die Bahn genügend genau ein Kreis. Taucht in Fahrtrichtung, etwas nach links, ein Hindernis auf, so wird dasselbe angefahren, wenn der Steuermann versucht, durch Umlegen des Steuers nach rechts auf der gestrichelten Kurve nach rechts auszuweichen; dagegen wird kurz dauernder Ausschlag des Steuers nach links das Schiff in wenig geänderter Fahrtrichtung auf nach rechts verschobener Bahn an demselben vorbeiführen. Soll das Schiff um 90^0 nach rechts abschwenken, so würde es nicht genügen, in der Lage S_3 das Steuer in seine neutrale Lage zurückzuführen; das Schiff würde übersteuert werden, da die lebendige Kraft der Rotation erst allmählich durch den Luftwiderstand aufgezehrt wird. Würde jeglicher Luftwiderstand plötzlich verschwinden, so würde dann das Schiff mit konstanter Winkelgeschwindigkeit sich dauernd um den Schwerpunkt drehen, während dieser mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig in der Bahntangente sich weiter bewegt. Soll das Schiff in der durch S_3 gezeichneten Richtung bleiben, so muß durch kurzen Steuerausschlag nach links die lebendige Kraft der Drehung aufgehoben werden. Angesichts des bei langsamer Drehgeschwindigkeit geringen Widerstandes wirkt ein Steuerausschlag nicht nur während seiner Dauer, sondern ähnlich wie ein Peitschenhieb auf den sich drehenden Kreisel.

REGISTER.




0 013 528 094